

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Textilní fakulta**

**Studijní program: Textil**

**Studijní obor: Oděvní technologie**

**Analýza tvarové stálosti plošných textilií**  
**Analysis of dimensional stability of fabrics**

**Diplomová práce**

**Autor: Bc. Jana Zoššáková**

**KOD/2011/06/24/MS**

**Vedoucí práce: Ing. Katarína Zelová**

**Rozsah práce:**

Počet stran textu	47
Počet obrázků	39
Počet tabulek	7
Počet grafů	14
Počet stran příloh	5

# ZADÁNÍ

## Body zadání:

1. Zpracujte rešerši zaměřenou na reologii a využití reologických modelů pro modelování vlastností textilií. Analyzujte zmačkání textilie z reologického hlediska. Popište deformace vzniklé v průběhu mačkání textilie působením tahu, tlaku a ohybu.
2. Experimentálně zhodnoťte schopnost zotavení textilií pomocí úhlu zotavení měřeného inovovanou objektivní metodou. Mačkavost vyjádříte prostřednictvím trvalých deformací vzniklých v textiliích.
3. Modelujte průběh deformace vzniklé v textiliích pomocí reologického modelu uvedeného v práci [1].
4. Porovnejte dosažené experimentální a teoretické výsledky. Navrhněte další způsob, který lze využít pro aproximaci exponenciální křivky deformace (Neuronové sítě).

## Doporučená literatura:

1. Zelová, K.: Predikce křivky zotavení plošné textilie pomocí reologického modelu. Seminář doktorandů. TU Liberec, 2010.
2. Elmarzougui, S., Abdessalem, B. S., and Faouzi, S.: A non-linear viscoelastic model for describing the fatigue behaviour of braided artificial ligaments, Journal of the Textile Institute, 101: 9, 788 — 794.
3. Halleb, N. and Amar S. B.: Model modification and prediction of mechanical behaviour of fabrics in uniaxial tension, Journal of the Textile Institute, 101: 8, 707 — 715.
4. Dong, X., Zhang, J., Zhang, Y., Ya, M. A study on the relaxation behavior of fabric's crease recovery angle, International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 15, No.1, 2003, pp. 47-55.

## Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 13.5.2011

Podpis

## Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucí diplomové práce **Ing. Kataríne Zelovej** za konzultace, cenné připomínky a trpělivost při realizaci této diplomové práce.

## ANOTACE

Diplomová práce je zaměřena na zkoumání schopnosti zotavení textilií. Pomocí inovované objektivní metody je nasnímán úhel zotavení v celé délce relaxace vzorku a zaznamenané úhly jsou naměřeny v programu Nis Elements. Prostřednictvím trvalých deformací, které vznikly v textiliích je vyjádřena mačkavost a za pomoci reologického modelu je modelován průběh celé deformace vzniklé v textiliích. V závěru je nastíněn nový způsob vyjádření exponenciální křivky deformace pomocí neuronových sítí.

### *Klíčová slova*

*Mačkavost; uhel zotavení; reologické modely; deformace; Maxwellův model; neuronové sítě.*

## ANNOTATION

This diploma thesis is focused on fabrics and their ability to recover. It is possible to scan the angle of recovery in its total length with the assistance of new innovative method of scanning and angles are measured in Nis Elements software. Wrinkling property is expressed by permanent deformations that have arisen in fabrics and the whole cycle of their deformation is measured by so called reological model. In the conclusion, new method of expressing exponential curve of deformation by Neural networks is described.

### *Keywords*

*Wrinkling property, The angle of recovery, Reological models, Deformation; Maxwell model, Neural network*

## Obsah

Úvod	10
1 Reologie a její využití pro modelování chování textilií	11
1.1 Popis viskoelastických vlastností reologickými modely	18
1.1.1 Prvky reologických modelů	21
1.1.2 Maxwellův reologický model	23
1.1.3 Kelvinův model	24
1.1.4 Tucketův model	26
1.1.5 Viskoelastický materiál	26
1.1.6 Chování viskoelastického materiálu při deformaci	27
2 Vyjádření mačkavosti jako trvalé deformace vzniklé v textiliích	28
2.1 Metoda měření úhlu zotavení	29
2.1.1 Princip metody	29
2.2 Faktory ovlivňující mačkavost textilií	29
2.3 Analýza mačkavosti z reologického hlediska	30
3 Experimentální část	33
3.1 Charakteristika materiálů	33
3.2 Charakteristika použitých měřících zařízení	34
3.2.1 Měřící zařízení	34
3.2.2 Příprava vzorků pro experiment	35
3.2.3 Snímání a měření úhlu zotavení	36
3.3 Úhel zotavení měřených materiálů	36
3.4 Vliv materiálového složení textilie na schopnost zotavení	38
3.4.1 Bavlněné materiály	38
3.4.2 Lněné materiály	40
3.4.3 Porovnání vlněného, polyesterového a směsového materiálu viskózy s bavlnou	41
3.5 Vyjádření podílu deformace	42
3.6 Modelování průběhu deformace pomocí reologického modelu	44
3.6.1 Modelování průběhu deformace pomocí Maxwellova modelu	45
3.6.2 Modelování průběhu deformace pomocí Kelvinova modelu	48
3.7 Využití neuronových sítí pro predikci mačkavosti	51
3.7.1 Postup zadávání neuronových sítí	52

3.7.2 Zpracování neuronových sítí.....	52
Závěr	54
Literatura	56
Seznam obrázků	58
Seznam tabulek	59
Seznam grafů	59
Seznam příloh	60

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Význam symbolu	Jednotka
$F$	síla	[N]
$\sigma$	napětí	[Pa]
$\sigma_t$	mezní napětí	[Pa]
$\sigma_0$	skokové napětí	[Pa]
$\eta$	viskozita	[Pa.s]
$T_o$	počáteční vzdálenost čelistí v	[mm]
$T_m$	konečná vzdálenost čelistí	[mm]
$T$	vzdálenosti čelistí	[mm]
$R$	křivost	[-]
$h$	tloušťka textilie	[mm]
$D_o$	dostava osnovy	[počet nití]
$D_u$	dostava útku	[počet nití]
$Mp$	plošná hmotnost	[g/m <sup>2</sup> ]
$m$	hmotnost	[kg]
$\varepsilon$	deformace	[-]
$\varepsilon_m^-$	průměrná deformace vláken	[-]
$\varepsilon_C$	celková deformace	[-]
$\varepsilon_E$	elastická deformace	[-]
$\varepsilon_Z$	zotavená deformace	[-]
$\varepsilon_P$	plastická deformace	[-]
$E$	modul pružnosti	[Pa]
$t$	doba snímání vzorku.	[s]
$t_Z$	doba zatížení vzorku	[s]
$t_o$	moment sejmutí závaží ze vzorku	[s]
$\alpha_Z$	úhel zmačkání	[°]
$\alpha_{1.}$	úhel konečné deformace	[°]
$\alpha_5$	úhel v páté minutě po sejmutí závaží	[°]
$\alpha_0$	úhel v první sekundě po sejmutí závaží	[°]
$\alpha_{300}$	úhel ve třísté sekundě po sejmutí závaží	[°]
$\alpha_{60}$	úhel v šedesáté minutě po sejmutí závaží	[°]



$l_0$	původní délka pružiny	[mm]
$\Delta l$	rozdíl délek	[mm]
$\varepsilon_1$	deformace pružného prvku	[-]
$\varepsilon_2$	deformace viskózního pístu	[-]
$X$	časová konstanta	[s <sup>-1</sup> ]

## Úvod

Při nošení oděvu je důležité, aby oděv plnil různé uživatelské vlastnosti. Je důležité, aby nedocházelo k přílišnému mačkání, které má špatný vliv především na estetický vzhled oděvu.

Mačkavost je vyjádření stavu, kdy je plošná textilie systematicky, nebo náhodně zmačkána. Vnější síly vyvolají na přehnutých plochách zlom a čím bude doba působení sil delší, tím se vytvoří na plošné textilií větší prostorová deformace. Mačkavost je ovlivněna mnoha fyzikálními a mechanickými parametry. Pro zjištění parametrů, které značně ovlivňují mačkavost, je nutno provést experiment.

Pro přesnější vyjádření mačkavosti textilií jsou v současné době modifikované původní metody hodnocení. Cílem metod je především objektivní hodnocení mačkavosti. Jelikož staré metody pro zjištění mačkavosti jsou pro dnešní požadavky nedostatečné, je zapotřebí provádět jejich modifikace a co nejvíce se přiblížit k reálným hodnotám mačkavosti. Jednou z možností je analyzovat mačkavost textilie na základě křivky zotavení. Tato křivka vyjadřuje závislost úhlu zotavení na čase relaxace. Úhel zotavení lze pak dále použít pro vyjádření trvalé deformace vzniklé v textiliích. Časový průběh deformace lze dále modelovat pomocí reologických modelů vhodných pro popis viskoelastického chování textilie.

Cílem této práce bylo zkoumat schopnost zotavení textilií pomocí inovované objektivní metody úhlů zotavení. Z naměřených hodnot úhlů zotavení analyticky dopočítat velikost deformací, které vznikají při mačkání.

Pomocí Maxwellova a Kelvinova mechanického reologického modelu byl modelován průběh celé deformace vzniklé v textiliích. V závěru je nastíněn nový způsob vyjádření exponenciální křivky deformace pomocí neuronové sítě.

## 1 Reologie a její využití pro modelování chování textilií

Pomocí reologického modelů můžeme popsat chování plošných textilií při deformaci. Řešení reologických modelů spočívá v nalezení závislosti mezi napětím, deformací a rychlostí deformace.

Pro porozumění chování plošných textilií při mačkavosti je potřeba provést jejich analýzu a následně popsat deformaci analyticky. Většinu reálných látek lze pomocí jednoduchých modelů popsat přibližně a v omezeném rozsahu namáhání.

Mezi základní reologické modely patří model hookovské látky, který lze dobře využít při popisu kovových materiálů. Reologické vlastnosti lze vyšetřovat pomocí teorie pružnosti. K popisu viskózních látek slouží model newtonovské látky. Plastické látky jsou popisovány pomocí Saint-Venantova modelu.

Reologické vlastnosti popisují chování látek při deformaci a rozhodují o parametrech zkoumaného materiálu.

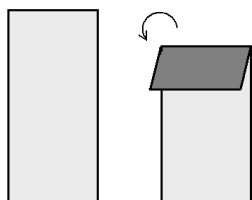
V rešeršní části jsou analyzovány jednotlivé metody pro měření úhlu zotavení. Dále je teorie zaměřená na střední napětí vláken při mačkaní a aplikace reologických modelů na zjištěné experimentální úhly zotavení.

Raja Zaouali, Slah Msahli a Faouzi Sakli [1] usilovali o určení parametrů, které ovlivňují mačkavost plošných textilií. Pro experiment bylo zvoleno padesát rozdílných materiálů, které byly následně vyhodnoceny, charakterizovány vstupními a výstupními parametry. Vstupní parametry charakterizují materiál, který je identifikován materiálovým složením, zákrutem, počtem přízí, vazbou, dostavou, tloušťkou, hmotností, pevností v tahu, splývavostí a prodloužením. Výsledné parametry mačkavosti, byly vyhodnoceny z hodnot naměřených ve směru osnova a útku. S použitím metody úhlu zotavení, který spočívá v zatížení vzorku hmotností po stanovenou dobu, byla mačkavost stanovena prostřednictvím vizuálního indexu a metody dutého válce. Pomocí statistických metod byly vybrány parametry, které značně ovlivňují mačkavost textilie. Lze konstatovat, že analyzované parametry příze a tkaniny v jednom směru (osnova a útek), mají větší vliv na mačkavost tkaniny, která se hodnotí mírou zbytkového úhlu ve stejném směru.

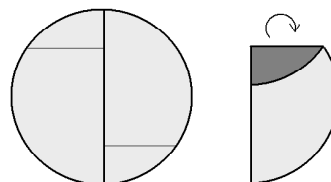
Pro objektivní určení úhlu zotavení byla stanovena metoda měření mačkavosti podle normy ČSN 80 0819 (EN 22 313) [2]. Mačkavost textilie byla měřena na proužku textilie o rozměrech 5 x 2cm (obrázek1). Vzorek byl v 1/5 svoji délky ohnut a zatížen

závažím o hmotnosti 1kg po dobu 1 hodiny. Po uplynutí doby zatížení se zkoumá relaxace vzorku a zjišťuje se úhel zotavení po stanovenou dobu relaxace vzorku.

V práci Zelové [3] je tato metoda inovována tak, aby byly získány co nejpřesnější hodnoty uhlu zotavení. Byl navržen nový půlkruhový tvar vzorku (obrázek 2) o poloměru 4,5cm, který je střižen v šesti směrech. Textilie je měřena ve 12 směrech pootočení od osnovy vždy po 30°.



Obrázek 1. Obdélníkový vzorek



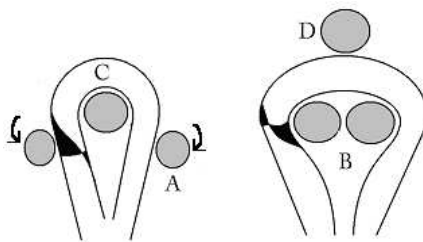
Obrázek 2. Půlkruhový vzorek

Úhel zotavení byl snímán pomocí webové kamery, která umožňuje zaznamenat úhel zotavení po celou dobu relaxace vzorku. Vzorek byl zatížený po dobu 5 minut totožně jako doba po kterou je zkoumána relaxace vzorku. Po dobu relaxace bylo zaznamenáno 24 fotografií, z kterých byl získán pomocí programu NIS-Elements naměřený úhel zotavení. Shodný tvar vzorku a postup experimentu bude použit ve vlastním experimentu této diplomové práce. Zjistit úhel zotavení v první vteřině po odlehčení závaží je obtížné a proto byl tento úhel v minulosti vypočten podle Sommerova vztahu 1.

$$\log \alpha_0 = \log \alpha_{60} - 3,5 \log \frac{\alpha_{60}}{\alpha_5} \quad (1)$$

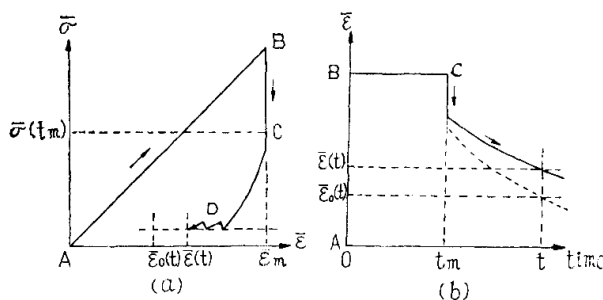
Naměřena hodnota prvního uhlu zotavení  $\alpha_0$  byla o 20% nižší oproti vypočtené hodnotě podle Sommera. Zelová (2009) [3] zkoumala vliv vazby při měření uhlu zotavení. Bylo zjištěno, že na úhel zotavení má značný vliv na počet nití ve vazbě. Díky tomuto zjištění je možné teoreticky předpovědět zvrásnění v dalších axiálních směrech.

Tatsuki Matsuo [4] se snažil využít obecnou teorii zaměřenou na střední napětí vláken při mačkání. Je velice důležité uvědomit si vztah mezi vlastnostmi vláken a tkanin. Obecně platí, že mechanické vlastnosti tkanin nezávisí pouze na vizuálních vlastnostech, ale také na tvaru a způsobu finální úpravy textilie.



Obrázek 3. Tvar ohybu v útku a osnovy

Při využití Monsantového testu je na obrázku 3 znázorněn ohyb ve směru osnovy a útku. Stavy (a) a (b) jsou zobrazeny střídavě. V tomto případě, dva typy prokluzování (posuvu) vznikají mezi textilními prvky tkaniny (přízemi). Následujícím způsobem stav (a) příze A přiléhá k přízi C a při ohybové deformaci dojde k jejímu klouzání (posunu ve směru šipky). Příze B je při ohybové deformaci stlačována přízí C. Při stavu (b) je pravděpodobně v přízích způsoben místní tlak, který je vyznačen černou plochou. Tento tlak způsobuje přesun, který nazýváme proklouznutí vláken v tečném směru ohybu a pohybují se v kolmém směru k ose příze, což má pravděpodobně za následek snížení tloušťky příze v bodě C. V procesu zotavení ohybu, mají tyto posuvy tendenci vracet se do původního stavu, avšak pod vlivem třecích sil přízí je relaxační proces ztížený. Mechanismus přehybu (obrázek 3) je možné analyzovat z reologického hlediska (obrázek 4).



Obrázek 4. Reologické zobrazení materiálu

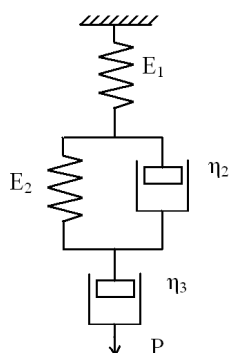
Hodnota průměrného napětí ve vláknech v zmačkaném stavu je udržována téměř konstantní. V bodě B vzniká deformace, která se rovná  $\varepsilon_m^-$ . V procesu zotavení z C na D se napětí obnovuje. Úhel zmačkání  $\alpha_z$  je popsán rovnicí (2) a může souviset se zbývajícím deformací  $\varepsilon^-$ .

$$\alpha_z = 180 \cdot \left( 1 - \frac{\varepsilon^-}{\varepsilon_m^-} \right), \quad (2)$$

kde  $\varepsilon_m^-$  je průměrná deformace místních vláken při mačkání.

Pro vyhodnocení mačkovosti je velmi důležité určit úhel po odlehčení závaží, jelikož nám umožní analyticky popsat deformaci. Rychlost a velikost zotavení plošných textilií určuje velikost třecích sil mezi strukturou příze a jednotlivými vlákny.

Na základě teorie viskoelastických textilních materiálů byl analyzován Maxwellův, Kelvinův a Burgersův (Tucketův) model (obrázek 5). V experimentu Xia Dong [5] bylo zjištěno, že je možné předpovědět úhel zotavení z Burgersova reologického modelu. Byly testovány vzorky o velikosti 6 x 5cm. V experimentu došlo k přeložení vzorku, který byl zahřát na teplotu 100°C po dobu 3 minuty a následně schlazen na teplotu 0°C po dobu 3 minuty. Při těchto cyklech byl vzorek zatížen hmotností 1,5kg. Byl sledován zotavovací úhel. Nejvyšší hodnoty korelačního koeficientu bylo dosaženo Burgersovým modelem, a proto je zde přiblížím pouze tento model. Maxwellův a Kelvinův model byl vysvětlen v literatuře literatura [5].



$$\varepsilon = \varepsilon_2 \cdot \exp\left[-\frac{E_2}{\eta_2} \cdot (t - t_1)\right] + \varepsilon_3 \quad (3)$$

$$\text{kde } \varepsilon_2 = \frac{P}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 \cdot t_1}{\eta_2}}\right) \quad (4)$$

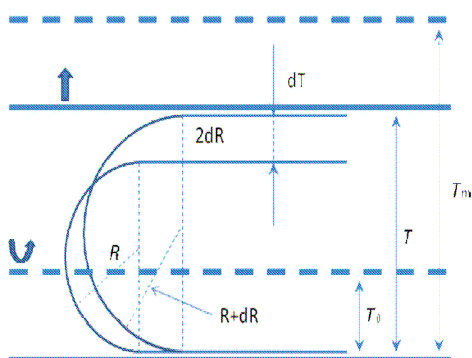
$$\varepsilon_3 = \frac{P}{\eta_3} t_1 \quad (5)$$

Obrázek 5. Burgersův model

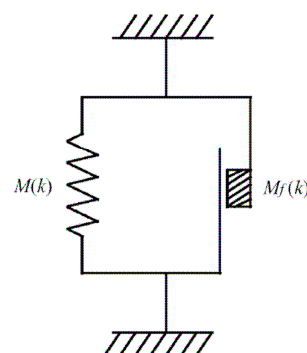
Při Burgersově modelu předpokládáme, že deformace povrchu vzorku je tahová a po odstranění závaží musí rychlá elastická deformace pružiny  $E_1$  uvést vzorek do polohy úhlu  $\alpha_1$ . Zpoždění deformace pružiny  $E_2$  a viskózního členu  $\eta_2$  se vrátí pomalu a vzorek se zrelaxuje o úhel  $(\alpha_2 - \alpha_1)$ . Člen  $\eta_3$  způsobí plastickou deformaci, trvalá plastická deformace je nevratná.

Úhel zotavení se nemění úměrně s časem. Při vyhodnocení jednotlivých přesností modelů Maxwellův model vykazoval hodnoty korelace od 0,41-0,64. Kelvinův model dosahoval hodnoty korelace v mezích 0,56-0,88 a Burgersův model hodnot korelace v rozmezí 0,81-0,99. Jako optimální byl vyhodnocen Burgersův model. Z predikčních modelů s výjimkou vlněného materiálu v keprové vazbě je Burgersův reologický model vyhovující. Z analýzy grafů, uvedených v literatuře [5] predikční modely odpovídají skutečné testované křivce a proto je Burgersův model považován za vhodný.

Podle Fengjun Shi a Younjiang Wang [6] byl teoretický model vyvinut prostřednictvím reprezentace pružných a třecích prvků. Třecí omezení je získané z druhé odmocniny zakřivení během deformace. Tato metoda je aplikována na studii mačkavosti chování tkanin. Při měření je nutno určit dva základní parametry pro model mačkavosti. Jedná se o ohybovou tuhost a hysterezi vzorku. Pokud je tkanina ohnutá a zmačkaná vzorek je deformován viskoelasticky. Pokud je vzorek odlehčený snaží se dostat ze stavu deformace. Znázornění zkoušky je zobrazeno na obrázku 6, kde test probíhá mezi dvěma rovnoběžnými deskami. Při pohybu desky dolů dochází k zmačkání tkaniny a při následném uvolnění dojde k opětovnému zotavení textilie do původního stavu.



Obrázek 6. Test mačkavosti [6]



Obrázek 7. Reologický model vzorku

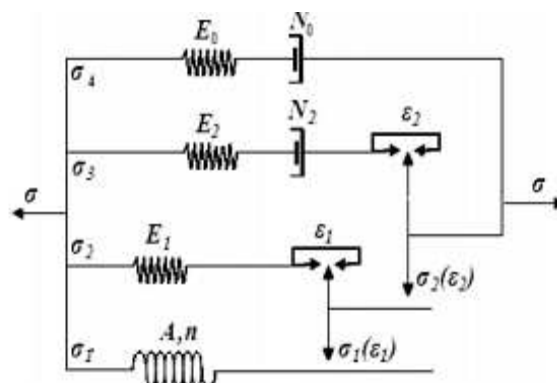
Jednoduchý reologický model (Hu, 2004; Shi, 2001; a kol. Shi, 2000) je použit v analýze, který se skládá z lineárního elastického prvku a třecího prvků, které jsou uspořádány paralelně (obrázek 7).

Při pohledu na obrázek 6. je zakřivená část považována za půlkruh a ostatní části jsou v paralelní uspořádání s deformačními deskami. Touto zjednodušenou teorií se zabýval Chapman a Hearle (1972), kteří porovnali řešení založené na půlkruhovém zjednodušení a našli odchylku pouze do 10 % pro lineární elastické materiály. V experimentu byly vybrány dva typy vzorků, směs vlny a polyesteru a tkaniny z česaných přízí. Byly provedeny zkoušky a) čistý ohyb b) mačkavost. Ohyb byl naměřen na přístroji KES dle obrázku 6. Sesun horní desky probíhal od vzdálenosti  $T_0$  do vzdálenosti  $T_m$  a byla odčítána vyvolaná síla  $F$  vzorkem. Výsledky odezvy testu mačkavosti mezi křivostí  $R$  a silou mačkavosti mezi dvěma pláty byly naměřeny a dopočítány pro každý vzorek. Poloměr křivosti z půlkruhovitého pásu vzorku je získán z tloušťky textilie  $h$  a vzdálenosti čelistí  $T$ .

Křivost  $R$  je počítána podle vzorce 6.

$$R = \frac{T - h}{2} \quad (6)$$

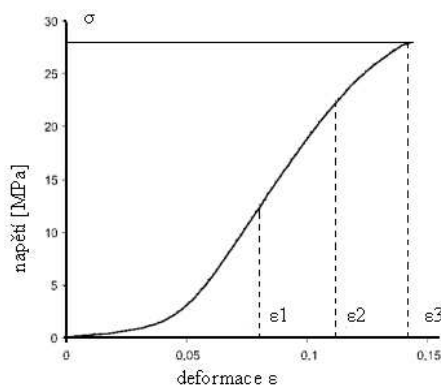
Rozdíly všech měřených a vypočtených vzorků se pohybovaly v rozmezí od 0,13 – 6,65 % což je považováno za minimální rozdíl. Největší odchylka byla nalezena pro vzorek vyrobený ze směsi vlny a polyesteru pro směr osnovy. V roce 2008 navrhl Halleb & Amar [7] reologický model, který je zobrazen na obrázku 8, za účelem předpovídat mechanické chování materiálů v různých úrovních napětí pouze ze znalostí jejich technických parametrů struktury tkaniny a příze.



Obrázek 8. Reologický model Halleb[7]

Na základě této práce vznikl návrh analytického modelu s deseti koeficienty, za účelem zjednodušení definice struktury materiálu. Koeficienty navrženého modelu jsou získané z napětí a relaxační křivky. Napětí je měřeno podle francouzské normy z roku 1985 pod označením NF-G 07- 001. Celkem bylo testováno 29 různých materiálů se stanovenými krajními limity pro jejich strukturu.

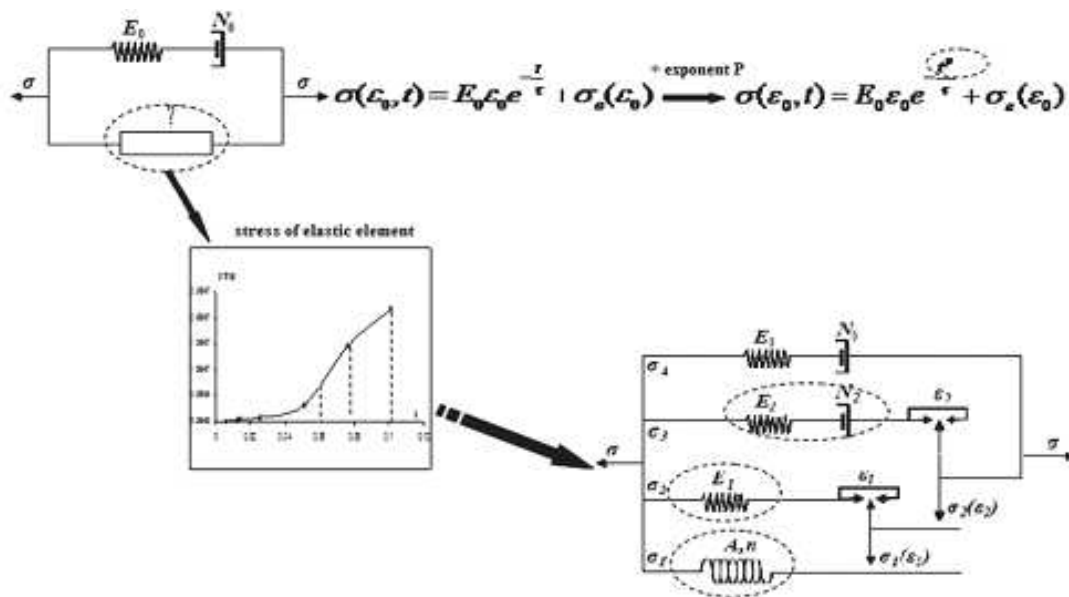
Pro většinu výsledků zkoumaných tkanin, představuje křivka na obrázku 9 závislost napětí a deformací a je rozdělena na tři zóny.



Obrázek 9. Závislost napětí a deformace

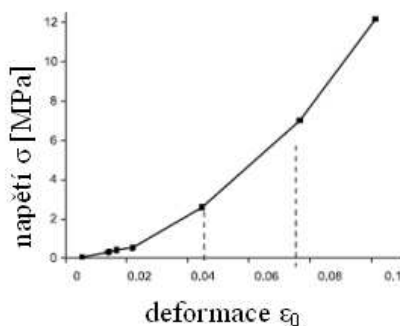


V první zóně ( $\varepsilon < \varepsilon_1$ ) je nelineární závislost a strmost vzrůstá. V této oblasti je příze zvlněná a je postupně namáhána do tahu. V druhé zóně ( $\varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_2$ ) je průběh lineární. V této oblasti jsou již příze v tahu. V třetí zóně ( $\varepsilon > \varepsilon_2$ ) je opět průběh nelineární s tendencí klesat. Relaxační testy jsou prováděny při různém napětí. Reologický přístup se používá k modelování struktury mechanického chování. Na obrázku 10 je zobrazeno zjednodušené schéma metodiky.



Obrázek 10. Zjednodušený schéma modelovací metodiky

Na základě studia relaxační křivky vznikl návrh modelu v paralelním spojení Maxwellova reologického modelu a pružného členu. Pro určení modelu byla vyšetřena křivka, která je znázorněna na obrázku 11. První nelineární zóna je popsána nelineární pružinou. Druhá lineární zóna je popsána lineární pružinou a třetí nelineární oblast je popsána Maxwellovým modelem.



Obrázek 11. Křivka deformace

Bylo zkoumáno analytické řešení, reologický model a stanoveno množství nezbytných parametrů pro jejich predikci. Bylo provedeno určení a následné zjištění mechanických vlastností textilií pomocí neuronových sítí, kde bylo nutno zadat vstupní parametry, aby systém mohl predikovat chování plošných textilií. Zjistilo se, že dochází k nevýznamným odchylkám od vyrobených vzorků, které vznikly nedostatečným množstvím měřených materiálů. Nepřesnost je proto považována za minimální. Oba modely predikce vzorků (analytické řešení a řešení prostřednictvím neuronových sítí) jsou funkční. Prostřednictvím těchto funkčních modelů je možno vyrábět tkaniny požadované kvality. Před zahájením výroby je možné přepokládat jejich charakteristiky relaxace.

## 1.1 Popis viskoelastických vlastností reologickými modely

Reologie se podle [8] zabývá studiem deformací hmoty. V tomto vědním oboru se zkoumají obecné zákony vzniku, rozvoje deformace materiálu, vlivem rozličných příčin a v různých termodynamických podmínkách. Jedním z jejích hlavních úkolů je nalezení vztahů mezi napětím, deformací a rychlostí deformace pro jednotlivé druhy látek.

Reologie rozšiřuje klasické disciplíny jako je teorie pružnosti podle Hookova zákona. Při smyku je napětí  $\sigma$  vyjádřeno jako součin modulu pružnosti  $E$  a deformací  $\varepsilon$ :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (7)$$

Modul pružnosti  $E$  je definován jako míra odporu materiálu vůči deformaci a poměrem síly působící kolmo na jednotku plochy.

Mechanika newtonovských tekutin je v reologii vyjádřena Newtonovským zákonem, kde smyková rychlost  $\varepsilon$  je úměrná smykovému napětí  $\sigma$  a viskozitě  $\eta$ :

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (8)$$

Viskozita  $\eta$  je fyzikální veličina, která udává poměr mezi napětím a změnou rychlosti. Charakterizuje vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mají větší viskozitu která znamená větší zpomalení pohybu kapaliny, nebo těles v kapalině [9].

V každé látce je obsažena pružná i viskózní deformace. Rozdíl je v rychlosti trvalé deformace, a proto se reologie snaží vytvářet reologické modely, kterými se snaží vystihnout chování rozdílných typů látek. Lze vytvořit modely pro pružné látky, kde platí Hookov zákon pro viskózní látky s využitím Newtonovho zákona, a pro plastické látky, kde je model popisován pomocí Saint-Venantova zákonů.


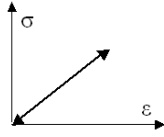
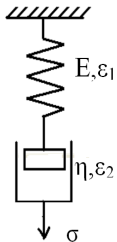
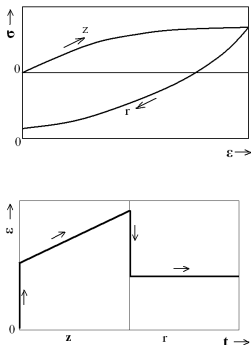
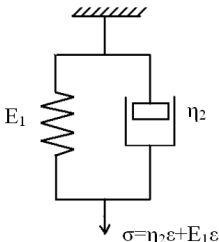
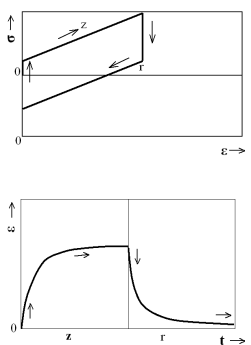
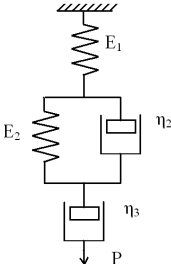
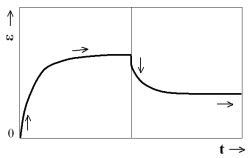
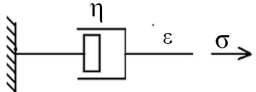
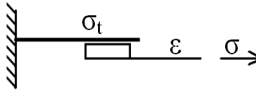
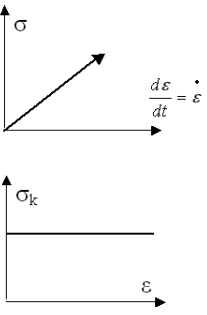
Tyto modely lze vyjádřit pomocí kombinace grafických symbolů, které zastupují jednotlivé členy. Člen H, který uvádí hookovskou látku je zobrazován symbolem pružiny. Člen N reprezentuje newtonovskou látku a je zobrazen symbolem pístu. Člen StV, určuje Saint-Venantův člen a je zobrazován jako kvádr tažený po podložce. Obecný reologický model získáme spojováním jednotlivých členů, přičemž jednotlivé členy lze spojovat v paralelním, nebo sériovém uspořádání. V obecném případě můžeme takto spojit libovolné množství členů [10].

V průběhu deformaci vznikají tři druhy deformací elastická, viskoelastická a plastická deformace.

- **Elastická deformace** je okamžitá, časově nezávislá a dokonale vratná. Závisí především na velikosti síly zatížení  $F_p$  a zatěžovacím času  $t_z$ . Pro elastickou deformaci platí Hookův zákon. U textilních vláken se prakticky nevyskytuje [11]
- **Viskoelastická deformace** je deformace časově zpožděná za podmětem. Podmět je v našem případě závaží. V průběhu doby zatížení narůstá a po odlehčení v závislosti na čase mizí. Deformace úzce souvisí se zotavovací schopností textílie. Viskoelastické vlastnosti jsou pro polymerní látky typické. Pro tvarování oděvních materiálů jsou tyto deformace velmi používané. [11]
- **Plastická deformace** je časově závislá a dokonale nevratná.

Pro popis chování materiálů při deformaci se používají reologické modely. Každá deformace je definovaná jiným reologickým elementem. V následující tabulce 1 jsou znázorněny deformace pomocí reologických modelů.

Tabulka 1. Deformace popsané pomocí reologických modelů

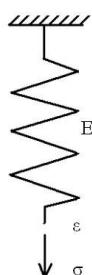
Elastická deformace	<p>Pružina</p> 	
Viskoelastická deformace	<p>Maxwell</p> 	
	<p>Kelwin</p> 	
	<p>Tuckett</p> 	
Plastická deformace	<p>Píst</p>  <p>Destičky</p> 	

### 1.1.1 Prvky reologických modelů

Pro popis lineárního chování látky jsou základními prvky reologických modelů ideální pružina pro elastickou látku, píst pro viskoelastickou látku a třecí element pro plastickou látku [12].

#### Pružná (elastická) látka

Pružnou látku vyjadřujeme Hookovým zákonem (9). Pružná látka je charakterizována pružinou, která je znázorněná na obrázku 12, kde  $E$  je modul pružnosti,  $\sigma$  je napětí a  $\varepsilon$  vzniklá deformace.



$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (9)$$

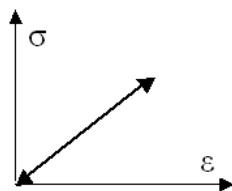
Obrázek 12. Pružina

Účinkem síly  $F$  se původní délka pružiny  $l_0$  zvětší o  $\Delta l$  a pro deformaci platí vztah (10) a deformace může být vyjádřena modulem pružnosti  $E$  (vzorec 11).

$$\varepsilon = \frac{l_{\Delta}}{l_0} \quad (10)$$

$$\varepsilon = EF \quad (11)$$

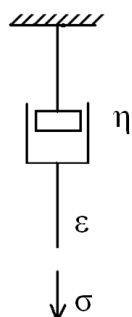
K deformaci pružiny dochází okamžitě působením napětí  $\sigma$ . Veškerá energie vynaložená na elastickou deformaci pružiny se naakumuluje. Po odlehčení se energie beze zbytku spotřebuje na návrat pružiny do původního nezdeformovaného stavu. Graficky je deformace pružiny znázorněna na obrázku 13.



Obrázek 13. Závislost napětí na deformaci pro pružný člen

## Viskózní látka

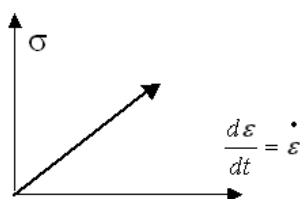
Pro viskózní látku platí Newtonův zákon, který je vyjádřen vztahem závislosti mezi rychlostí deformace  $\dot{\varepsilon}$  a napětím  $\sigma$ .



$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = \eta \dot{\varepsilon} \quad (12)$$

Obrázek 14. Píst

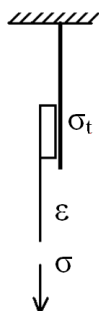
Viskozita materiálu je označena symbolem  $\eta$  a je nezávislá na rychlosti deformace a velikosti napětí. Píst znázorněný na obrázku 14 vyjadřuje viskózní stav a vložená mechanická energie se přeměňuje na tepelnou. Na obrázku 15 je graficky znázorněná viskózní deformace pístu.



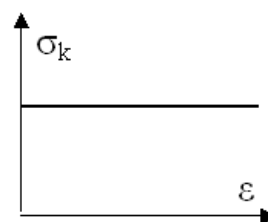
Obrázek 15. Deformace pístu

## Plastická látka

Model plastické látky je popisován jako San-Venantov. Reologickým modelem pro plastický model jsou dvě destičky (obrázek 16) mezi nimiž působí tření, které odpovídá meznímu napětí, které je označováno jako  $\sigma_t$ .



Obrázek 16. Destičky



Obrázek 17. Závislost napětí na deformaci pro plastický člen

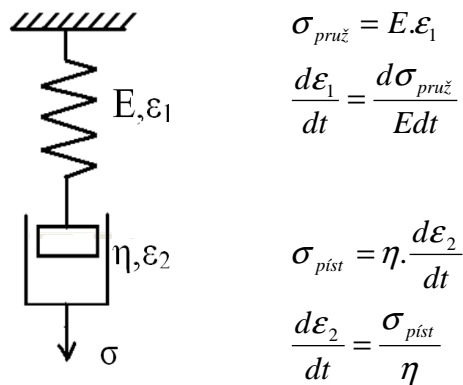
Vnitřní síla potřebná pro překonání odporu proti pohybu se nazývá mez kluzu a je označena jako  $\sigma_k$ . Vložená energie je v tomto případě nevratná.

### 1.1.2 Maxwellov reologický model

Maxwellov reologický model [8] vyjadřuje spojení hookovské a newtonovské látky, který je zapsán vztahem 13.

$$M = H - N \quad (13)$$

Skládá se z prvků pružiny a pístu. Pružina vyjadřuje elastický prvek modulu pružnosti  $E$  a píst vyjadřuje viskózní prvek  $\eta$ . Prvky Maxwellova reologického modelu jsou uspořádány sériově (obrázek 18).



Obrázek 18. Maxwellov model

kde:  $\sigma$  – napětí [Pa],  
 $E$  – modul pružnosti [Pa],  
 $\eta$  – viskozita [Pa.s],  
 $\varepsilon_1$  – deformace pružného prvku [-],  
 $\varepsilon_2$  – deformace viskózního pístu [-].

V Maxwellově reologickom modelu lze deformaci rozdělit na dvě složky (čistě elastickou a viskózní). Při sériovém spojení prvků je celková deformace rovna součtu všech deformací

$$\varepsilon = \varepsilon_{pruž} + \varepsilon_{píst} \quad (14)$$

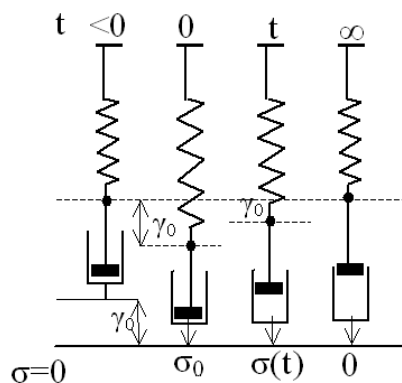
Napětí je v obou prvcích a v celém modelu totožné (vzorec 15).

$$\sigma = \sigma_{pruž} = \sigma_{píst} \quad (15)$$

Maxwellov reologický model je vyjádřen vztahem 16.

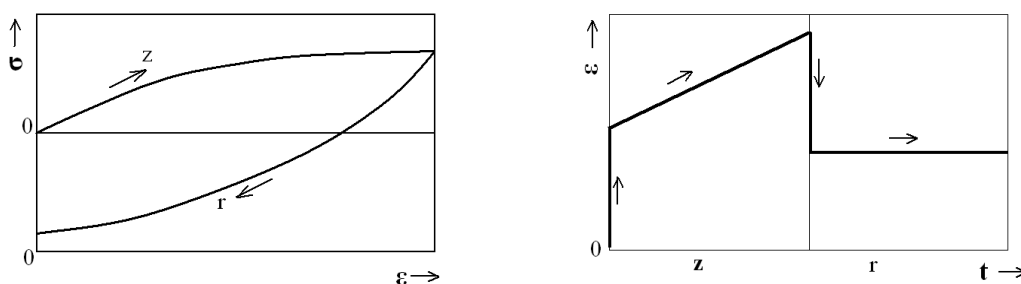
$$\dot{\sigma} + \frac{E}{\eta} \sigma = E \cdot \dot{\varepsilon} \quad (16)$$

Při relaxaci materiálu v určitém čase (zpravidla  $t=1$ ) vznikne skokem deformace  $\varepsilon_0$ . Při vzniknuté deformaci pružina zareaguje okamžitě a deformace pístu je nulová. Vzniklé počáteční napětí  $\sigma$  je dáno hookovskou odezvou pružiny a platí vztah  $\sigma = E \cdot \varepsilon_0$ . Působením času se píst tahem pružiny pohybuje, deformace pružiny klesá a tím klesá napětí v modelu (obrázek 19) [10].



Obrázek 19. Maxwellův model a schématické znázornění relaxačního pokusu

U reálných materiálů se časový průběh relaxace napětí stanovuje experimentálně. Obrázek 20 znázorňuje celý průběh vzniklé deformace při Maxwellově reologickém modelu. Nevýhodou je nekonečně velká deformace za čas. Viskózní podíl deformační energie se přeměňuje na teplo [12].



Obrázek 20. Zatížení a relaxace u Maxwellova modelu

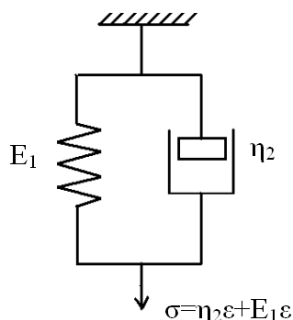
### 1.1.3 Kelvinův model

Kelvinův model vyjadřuje podíl Hookovské a Newtonovské látky, která je zapsána vztahem 17.

$$K = H / N . \quad (17)$$



Kelvinův model [8] znázorňuje paralelní uspořádání pružného prvku  $E_1$  a vazného prvku  $\eta_2$ . Uspořádání prvků je znázorněno na obrázku 21.



Obrázek 21. Kelvinův model

Kelvinův model popisuje časově závislé napěťově deformační chování polymerů, které vykazují zpožděnou elasticitu. Paralelní spojení pružiny a pístu popisuje přechod pružiny z jednoho deformačního stavu do druhého. Podle tohoto modelu jsou si v každém okamžiku elastická a viskózní složka smykové deformace rovny (vzorec 18).

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2. \quad (18)$$

Součet napětí vyvolaných elastickou a viskózní složkou je roven celkovému napětí  $\sigma$  vyjadřuje vzorec 19.

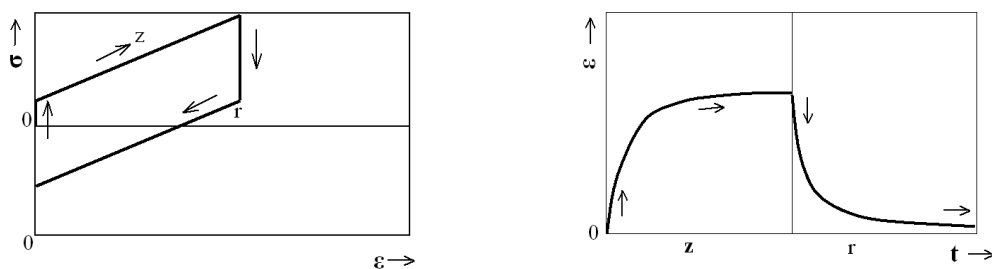
$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2, \quad (19)$$

a Kelvinův model je popsán vztahem 20.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (20)$$

Časový průběh deformace Kelvinova modelu viskoelastického materiálu je schematicky znázorněn na obrázku 22, kde je zobrazeno dopružování Kelvinovy hmoty.

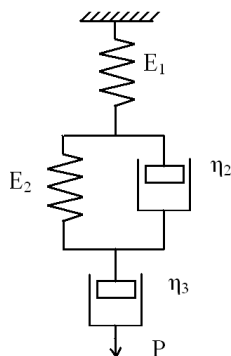
Na obrázku 22 je znázorněné zatížení a relaxace vzorku při Kelvinově reologickém modelu. Volbou poměru  $E$  a  $\eta$  lze simulovat i téměř pružnou, nebo viskózní deformaci. [12]



Obrázek 22. Deformační odezva při Kelvinovom reologickom modelu

### 1.1.4 Tucketův model

Schéma Tucketova modelu [8] je zobrazeno na obrázku 23, kde je znázorněno sériové spojení modulu pružiny  $E_1$ , Kelvinova modelu  $E_2$ , viskozity  $\eta_2$  a prvku s viskozitou  $\eta_3$ .

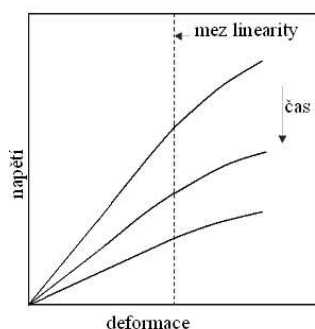


Obrázek 23. Tucketův model

Deformace Tucketova modelu je popsána jako časově závislá deformace lineárního amorfního polymeru, jehož napětově deformační chování je vyjádřeno ideálně elastickou deformací, zpožděnou elastickou deformací a nevratným viskózním tokem.

### 1.1.5 Viskoelastický materiál

Polymerní látky [13] se deformují elasticky pouze v oblasti malých deformací. Hranice mezi lineárním a nelineárním průběhem deformace se nazývá mez linearit a závisí na velikosti deformace. Průběh deformace je zobrazen na obrázku 24.



Obrázek 24. Vztah mezi napětím a deformací viskoelastické látky

Z teorie lineární viskoelastivity vyplývá obecné vyjádření mezi napětím  $\sigma$  a deformací  $\varepsilon$  pro libovolně zvolený čas  $t$ , který je dán vztahem 21.

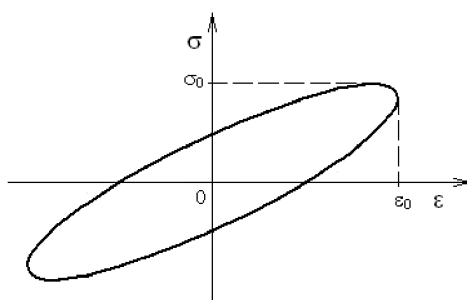
$$\sigma(t) = E(t) \cdot \varepsilon, \quad (21)$$

kde  $E(t)$  je časově závislý modul pružnosti.

Veličiny charakterizující viskoelastickou odezvu jsou časově závislé. Časově závislý modul pružnosti  $E(t)$ , představuje elastickou deformaci a viskozitu  $\eta(t)$ , která vyjadřuje nevratnou deformaci.

Viskoelastické materiály jsou přechodovou oblastí mezi ideálně elastickými a viskózními materiály. Většina reálných látek je při namáhání charakterizována viskózním i elastickým chováním.

Část vložené mechanické energie při harmonickém namáhání viskoelastických materiálů se zpětně využije při následném odlehčení a zbytek energie se přemění v teplo. Množství přeměněné mechanické energie v tepelnou energii je úměrné ploše hysterezní křivky (obrázek 25), která udává závislost mezi napětím a poměrnou deformací v průběhu jednoho cyklu při harmonickém namáhání viskoelastických materiálů. Závislost mezi napětím a poměrnou deformací je nelineární, a proto u viskoelastických materiálů neplatí Hookův zákon [14].

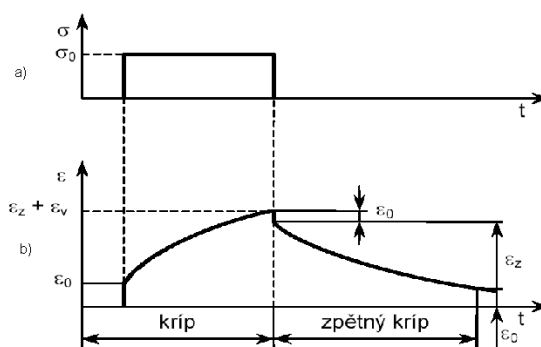


Obrázek 25. Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání u viskoelastických materiálů

#### 1.1.6 Chování viskoelastického materiálu při deformaci

Při zjišťování viskoelastického chování textilií je vzorek zatížen stálým deformačním napětím a po odlehčení je sledován postupný růst deformace s časem. Jde o zkoušku s konstantním napětím (kríповá zkouška). Kríповé a relaxační zkoušky jsou důležité zvláště u polymerních materiálů, kde je silná závislost mechanických vlastností na čase a to zejména v přechodové oblasti.

Kríповý experiment je realizován při konstantním napětí  $\sigma_0$ . Časový průběh napětí a deformace jsou znázorněny na obrázku 26. Kríповá křivka představuje odezvu deformace na jednotkový skok [15].



Obrázek 26. Experiment krípu a zpětného krípu na nelineární viskoelastické látce  
a) časový průběh napětí, b) časový průběh deformace

Časově závislou deformaci zde lze rozdělit do třech složek (vzorec 22).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_z(t) + \varepsilon_v(t), \quad (22)$$

kde  $\varepsilon_0$  elastická časově nezávislá deformace,  
 $\varepsilon_z$  časově závislá (zpožděná) dokonale vratná deformace,  
 $\varepsilon_v$  deformace odpovídající časově závislému dokonale nevratnému viskóznímu toku.

## 2 Vyjádření mačkavosti jako trvalé deformace vzniklé v textiliích

Mačkavost je základní vlastností popisující stálost tvaru plošné textilie. K účinkům mačkání dochází po přehnutí, zatížení vzorku a následně vznikne trvalá deformace, která se po čase může částečně zotavit [15].

Pro zjišťování mačkavosti se používají metody, které vycházejí z principů měření mačkavosti. Nejrozšířenější způsob měření mačkavosti je založen na měření úhlu zotavení  $\alpha$  plošné textilie ve tvaru proužku. Standardní rozměr proužku je 5 x 2cm. Další metody užívané pro měření mačkavosti jsou například metoda AKU a skládaného proužku textilie.

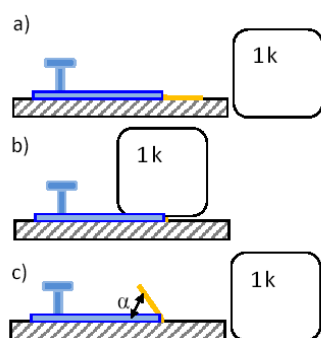
Jelikož problematika principu měření úhlu zotavení úzce souvisí s použitou metodou v experimentu, v následujícím odstavci je představena metoda měření úhlu zotavení.

## 2.1 Metoda měření úhlu zotavení

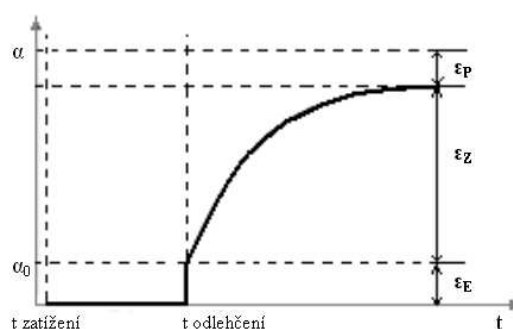
Při měření mačkavosti podrobujeme materiál silám, při jejichž působení dochází k viskoelastické deformaci vzorku, vznikají záhyby a zmačkání materiálu. Metoda je stanovena dle ČSN 80 0819 (EN 22 313) [2].

### 2.1.1 Princip metody

Textilie je ohnuta a zatížena závažím o hmotnosti  $m$  (obrázek 27). Závaží působí po dobu  $t_z$ , následně vzorek odlehčíme a tento moment označíme časem  $t_o$ . Při zatížení dochází v textilií k ohnutí vláken vnějšími silami a tím se změní jejich vnitřní struktura. Po odlehčení vzorku dojde k napřímění materiálu do polohy úhlu  $\alpha_o$ , která je obrazem okamžité elastické deformace (obrázek 27). Pokud bychom sledovali zotavení vzorku, až do finální polohy, dokázali bychom určit konečnou deformaci složenou z plastické deformace a elastické deformace. Poloha konečné deformace je označena úhlem  $\alpha_f$ . Po dosažení rovnovážného stavu tj. kdy křivka zotavení nevykazuje nárůst, vzniká plastická deformace  $\varepsilon_p$ . Na následujícím obrázku 28 je znázorněn průběh zotavení materiálu deformační křivkou, kde měření probíhalo po dobu  $t$  [15].



Obrázek 27. Měření úhlu zotavení textilie a) původní stav b) zatížení c) relaxace vzorku[17]



Obrázek 28. Křivka průběhu deformace proužku textilie

## 2.2 Faktory ovlivňující mačkavost textilií

Mezi významné faktory, které ovlivňují mačkavost, patří čas po kterou je měřený vzorek zatížen, relativní vlhkost vzduchu, hmotnost závaží a doba relaxace materiálu.

**a) Klimatické podmínky**

Vlivem sorpčních dějů dochází u vláken ke změnám vlastností. Vlákná bobtnají, mění se jejich mechanické vlastnosti a mění se jejich hmotnost. Klimatické podmínky pro zkoušení textilních materiálů jsou předepsány normou. Teplota vzduchu:  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkost vzduchu:  $65 \pm 2\%$  [16].

**b) Hmotnost a doba zatížení**

Celková doba zatížení významně ovlivňuje deformaci textilního materiálu. Je nutné, aby síla, kterou závaží působí na zkoumaný vzorek, byla rovnoměrně rozložena po celé ploše vzorku. Čím bude větší hmotnost závaží, tím způsobíme větší nevratné deformace. Doba zatížení výrazně ovlivňuje celkovou relaxaci materiálu.

**c) Doba relaxace**

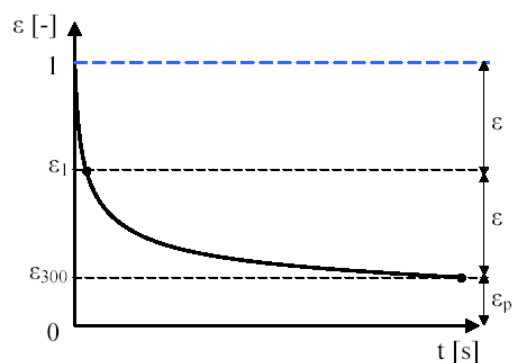
Doba relaxace je měřena od sejmutí závaží až po poslední snímání úhlu zotavení.

### 2.3 Analýza mačkovosti z reologického hlediska

Při zjišťování mačkovosti textilie [17] je důležité zjistit velikost úhlu zotavení. Vliv mačkovosti se projevuje až po přehnutí a zatížení vzorku, kdy vznikne trvalá deformace, která se po čase může částečně zotavit. Pro reologickou analýzu byla vyjádřena trvalá deformace vztahem (23) jako závislosti zotavení na čase.

$$\varepsilon(t) = 1 - \frac{\bar{\alpha}(t)}{180^{\circ}} [-] \quad (23)$$

Pro vyjádření hodnoty mačkovosti textilie platí, že čím je trvalá deformace menší, tím má materiál větší mačkovost. Pokud bude úhel zotavení roven nule, deformace bude rovna 1. Hodnota deformace se pohybuje v intervalu (0,1), kde 0 určuje nemačkovost textilie a hodnota 1 vyjadřuje mačkovost textilie.



Obrázek 29. Křivka zotavení textilií [17]

Průběh deformace v závislosti na čase lze definovat křivkou zotavení jako funkci úhlu zotavení plošné textilie. Křivka zotavení plošné textilie je dána exponenciální křivkou (obrázek 29). Viskoelastické vlastnosti textilie jsou popsány deformací  $\varepsilon_v$ . Jednotlivé typy deformací byly z experimentální křivky zotavení vyjádřené vztahy 24-26.

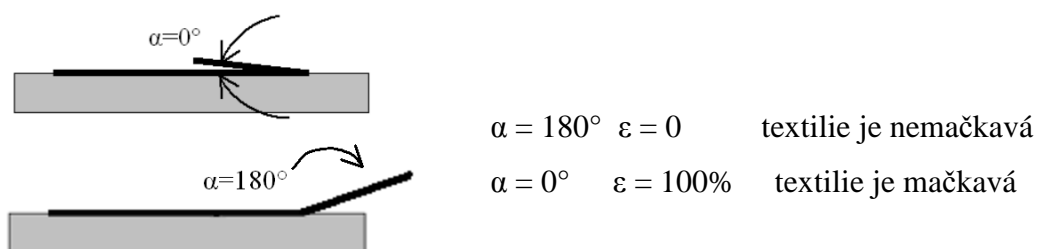
$$\varepsilon_p = \varepsilon_{300} = 1 - \frac{\alpha_{300}}{180^\circ} \quad (24)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 - \varepsilon_p, \text{ kde } \varepsilon_1 = 1 - \frac{\alpha_1}{180^\circ} \quad (25)$$

$$\varepsilon_E = 1 - \varepsilon_1 \quad (26)$$

kde  $\varepsilon_E$  – elastická deformace ,  
 $\varepsilon_v$  – zotavená (viskoelastická) deformace ,  
 $\varepsilon_p$  – plastická (trvalá) deformace,  
 $\alpha_1$  – úhel v první sekundě po sejmutí závaží [ $^\circ$ ],  
 $\alpha_{300}$  – úhel ve třísté sekundě po sejmutí závaží [ $^\circ$ ].

Čím bude hodnota trvalé deformace  $\varepsilon_p$  menší, tím je plošná textilie víc mačková. Na obrázku 30 je znázorněn počáteční úhel zotavení, který znázorňuje zatížení vzorku při  $\alpha = 0$ . Při relaxaci vzorku se úhel zotavení narůstá.



Obrázek 30. Schématické znázornění mačkání vzorku

Z vyhodnocení úhlu zotavení byla vyjádřena plastická deformace, která ovlivňuje mačkavost textile. Při sledování mačkavosti jednotlivých textilních materiálů podle [18] bylo zjištěno, že mačkavost se zvyšuje v následujícím pořadí:

- vlna
- přírodní hedváb
- acetátové vlákno
- viskóзовé vlákno
- bavlna
- len

Mačkavost záleží na struktuře a morfologické stavbě vlákna. Šupinatý povrch a jádro vlněného vlákna dodávají vláknu pružnost a tažnost. Hedvábí vykazuje oproti vlně odlišnou strukturu. Obsah fibroinu ve vláknech nevykazuje shodnou pružnost jako ve vlně. Celulóзовé materiály mají uspořádání vláken těsnější a tím je mačkavost pravděpodobně zvýšena. Lněná vlákna se skládají ze svazku jednotlivých vláken. Vnitřní stavba morfologických lýkových vláken má za příčinu vysokou mačkavost. V experimentální části byly použity různé druhy materiálů. Teoretické vyjádření deformace materiálů koresponduje s naměřenými hodnotami úhlu zotavení.



### 3 Experimentální část

Cílem experimentu bylo zhodnotit schopnost zotavení textilií pomocí úhlu zotavení měřeného inovovanou objektivní metodou a modelovat průběh deformace vzniklé v textiliích pomocí reologického modelu. Na závěr porovnat dosažené experimentální a teoretické výsledky a navrhnout další způsob, který je možný použít pro aproximaci exponenciální křivky deformace.

Cílem experimentu diplomové práce bylo:

- Vyjádřit úhel zotavení materiálu a analyzovat vliv materiálového složení na zotavení textilie.
- Vyjádřit mačkovost jako trvalou deformaci vzniklou v textiliích.
- Modelovat průběh deformace pomocí reologického modelu.
- Nastínit vyhodnocení mačkovosti pomocí neuronových sítí.

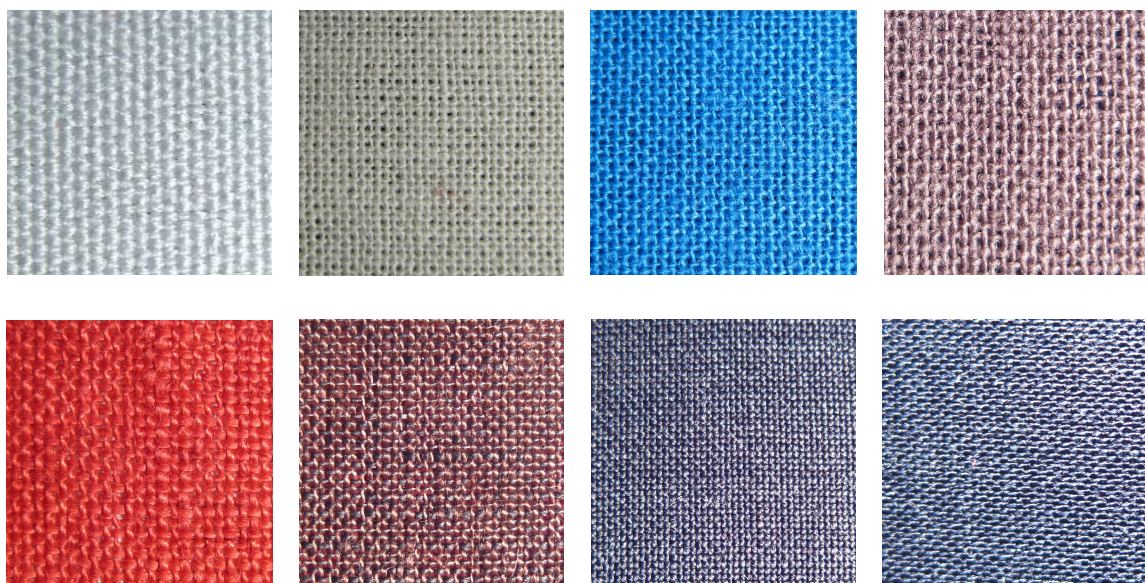
Experiment byl proveden na měřícím zařízení, které bylo realizováno na KOD ve spolupráci s KHT. Měření bylo realizováno při teplotě vzduchu 25°C a relativní vlhkosti 38,5%.

#### 3.1 Charakteristika materiálů

Pro experiment bylo vybráno 8 druhů materiálu v plátňové vazbě a odlišného materiálového složení. Charakteristika a značení použitých vzorků jsou uvedeny v tabulce 2, kde je uvedeno materiálové složení vzorků, plošná hmotnost  $M_p$ , jemnost  $T$  útku a osnovy, dostava útku  $D_u$  a dostava osnovy  $D_o$  a nakonec tloušťka materiálu  $h$ . Hodnocené vzorky materiálů jsou zobrazeny na obrázku 31 a v příloze 1 jsou přiloženy reálné materiály.

Tabulka 2. Charakteristika hodnocených materiálů

značení vzorků	materiálové složení	vazba	$M_p$ [g/m <sup>2</sup> ]	T osnova [tex]	T útek [tex]	$D_o$ [nití/10cm]	$D_u$ [nití/10cm]	h [mm]
<b>Z1</b>	100% PL	plátňo	178	41	39,1	270	180	0,5
<b>Z2</b>	100% CO	plátňo	152,9	29	29,7	260	250	0,37
<b>Z3</b>	100% CO	plátňo	123,6	28,2	29,4	240	210	0,4
<b>Z4</b>	100% CO	plátňo	137,7	28,8	30,9	260	190	0,4
<b>Z5</b>	100% LI	plátňo	194,9	54	53,6	170	140	0,44
<b>Z6</b>	100% LI	plátňo	110,6	26,3	25,6	230	210	0,34
<b>Z7</b>	100% WO	plátňo	140,9	24,8	23,6	290	250	0,25
<b>Z8</b>	CV /CO	plátňo	114,7	18,9	13,4	390	290	0,27



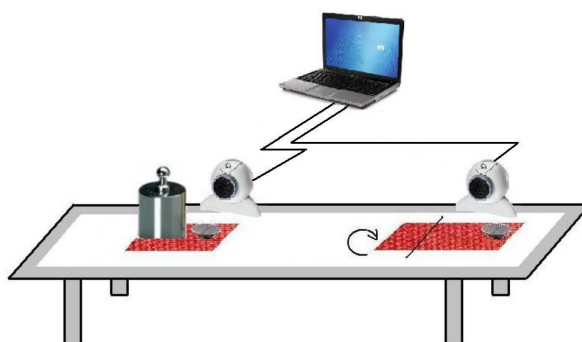
Obrázek 31. *Materiály použité při experimente*

## 3.2 Charakteristika použitých měřících zařízení

Snímání úhlu zotavení bylo provedeno pomocí web kamery a nasnímané záběry byly přeneseny do počítače za použití programu CAPTURE. Tento program je schopen pořizovat záběry v námi definovaném čase. Měřené vzorky byly upevněny na speciálním měřicím stole a snímány pomocí webové kamery.

### 3.2.1 Měřicí zařízení

Měření vzorků bylo rozděleno do dvou částí. V první části proběhlo zachycení zkoumané relaxace vzorků při úhlu zotavení a v druhé části byla zkoumaná relaxace naměřena a vyhodnocena. Vzorky byly nasnímány pomocí web kamery a přeneseny do počítače. Program CAPTURE dokáže nasnímat fotografie ve stanoveném čase. Na obrázku 32 je znázorněno uspořádání měřicí sestavy.

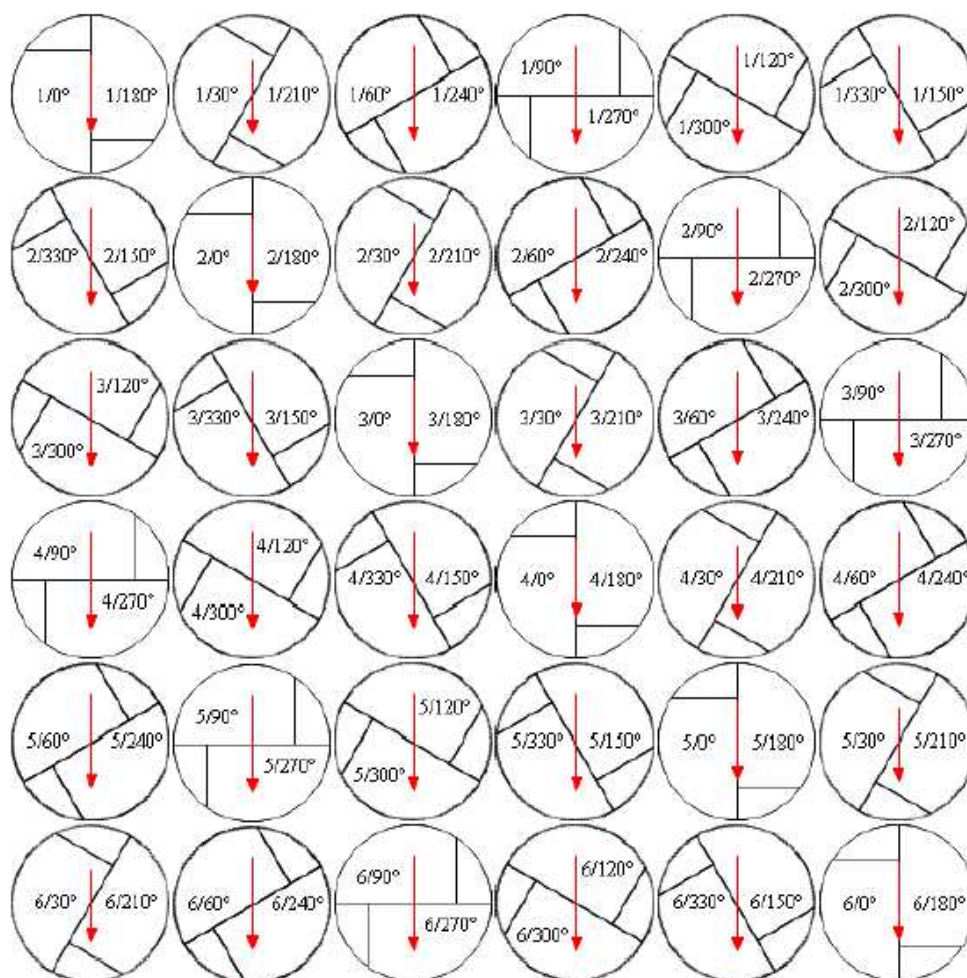


Obrázek 32. *Měřicí zařízení*

Nasnímané fotografie byly zpracovány v programu LUCIE NIS ELEMENTS, kde bylo možno naměřit uhly zotavení celé relaxace vzorku.

### 3.2.2 Příprava vzorků pro experiment

Úhel byl naměřen pomocí inovované metody ve směru osnovy, útku a v ostatních směrech vždy s pootočením po 30 stupních. Vzorky mají půlkruhový tvar o průměru 4,5 cm. Tvar vzorků byl modifikován pro předejití nechtěné rotace vzorku při relaxaci. Vzorky byly střiženy po třiceti stupních ( $0^\circ/180^\circ$ ,  $30^\circ/210^\circ$ ,  $60^\circ/240^\circ$ ,  $90^\circ/270^\circ$ ,  $120^\circ/300^\circ$  a  $150^\circ/330^\circ$ ). Na obrázku 33 je zobrazeno rozmístění přípravy vzorků. Pro každý stupeň vzorky bylo provedeno 6 měření. Vzorky jsou rozmístněny diagonálně pro dosažení optimálnějšího rozložení v ploše.



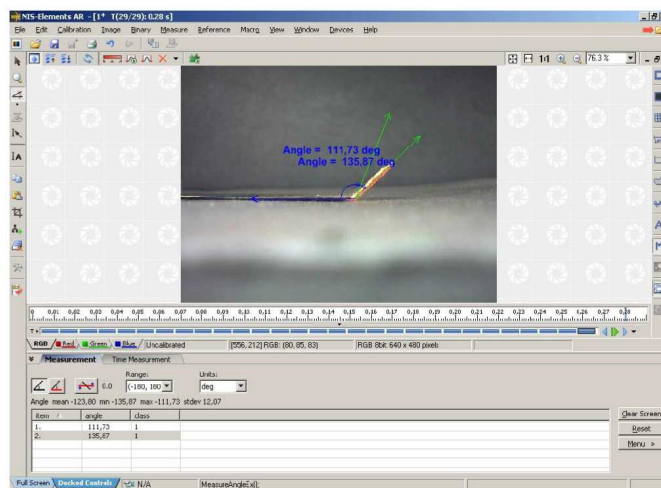
Obrázek 33. Příprava vzorků [19]

### 3.2.3 Snímání a měření úhlu zotavení

Vzorek textilie byl umístěn a upevněn na pevnou podložku tak, aby zůstal 1 cm vzorku vysunutý. Vzorek se v tomto místě přehne a zatíží závažím o hmotnosti 1 kg. Závaží působilo na přehnutý vzorek silou 10N.

Snímání časového záznamu úhlu zotavení bylo realizováno pomocí programu CAPTURE, kde je možné nastavit interval snímání. Bylo snímáno 24 záběrů po dobu 10 min. Prvních 5 min byl vzorek zatížen a po odlehčení byl v prvních 10 sekundách snímán každou sekundu a následně do první minuty každých 5 sekund. Od první minuty relaxace vzorku byl snímán každou minutu až do ukončení doby relaxace.

Měření úhlu zotavení z pořízených digitálních fotografií bylo provedeno v programu NIS ELELENTS, kde byl změřen uhel zotavení z nasnímaných vzorků (obrázek 34). Program disponuje funkcí „measure free angle“, která umožňuje měření úhlu zotavení na zachycených snímcích pořízených z web kamery. Všechny naměřené uhly byly následně zpracovány a jsou uvedeny v příloze 1.



Obrázek 34. Program Nis Elements

### 3.3 Úhel zotavení měřených materiálů

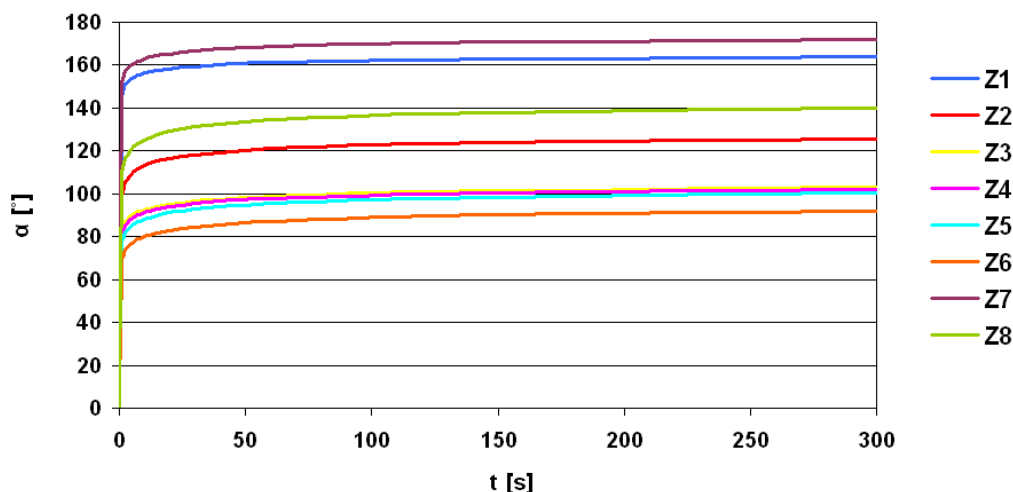
Materiály byly naměřeny pomocí inovované metody pro 12 úhlů natočení vzorku. Jelikož se jedná o velké množství naměřených dat byly vyneseny průměrné hodnoty všech materiálů do jednoho grafu a následně rozebrány uhly natočení pro jednotlivé materiály samostatně (kapitola 3.4).

Tabulka 3. Průměrné hodnoty naměřených úhlů

<b>Materiál</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	<b>Z4</b>	<b>Z5</b>	<b>Z6</b>	<b>Z7</b>	<b>Z8</b>
<b>t [s]</b>	<b><math>\varnothing\alpha</math> [°]</b>	<b><math>\varnothing\alpha</math> [°]</b>	<b><math>\varnothing\alpha</math> [°]</b>	<b><math>\varnothing\alpha</math> [°]</b>	<b><math>\varnothing\alpha</math> [°]</b>	<b><math>\varnothing\alpha</math> [°]</b>	<b><math>\varnothing\alpha</math> [°]</b>	<b><math>\varnothing\alpha</math> [°]</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	143,3	96,1	81,3	79,2	75,5	67,6	151,0	107,3
2	149,4	103,5	85,8	84,0	80,5	72,3	155,6	114,5
3	151,7	106,3	87,8	86,1	82,7	74,5	157,9	117,6
4	152,9	108,1	89,0	87,4	84,1	75,9	159,1	119,6
5	153,8	109,4	89,9	88,4	85,1	76,8	160,1	121,0
6	154,6	110,4	90,6	89,1	85,9	77,6	160,8	122,1
7	155,1	111,3	91,2	89,7	86,6	78,4	161,4	123,0
8	155,6	111,9	91,6	90,3	87,2	79,0	161,9	123,8
9	156,0	112,5	92,1	90,8	87,6	79,4	162,5	124,4
10	156,4	113,1	92,5	91,3	88,1	79,9	162,8	125,1
15	157,5	115,2	94,1	92,9	90,0	81,8	164,5	127,6
20	158,3	116,4	95,1	93,9	91,1	83,0	165,3	129,0
25	158,9	117,4	95,9	94,8	92,1	83,9	166,0	130,2
30	159,4	118,2	96,5	95,4	92,7	84,6	166,5	131,1
35	159,8	118,8	97,0	96,0	93,3	85,1	167,1	132,0
40	160,2	119,3	97,4	96,5	93,9	85,6	167,5	132,6
45	160,5	119,9	97,8	96,9	94,4	86,1	167,9	133,0
50	160,8	120,3	98,1	97,3	94,7	86,5	168,2	133,5
55	161,1	120,7	98,4	97,6	95,1	86,8	168,5	134,0
60	161,4	121,0	98,6	98,0	95,4	87,1	168,7	134,4
120	162,4	123,2	100,8	99,9	97,7	89,5	170,3	137,3
180	163,1	124,2	101,7	100,8	98,9	90,7	171,1	138,4
240	163,6	125,0	102,4	101,6	99,7	91,4	171,6	139,4
300	164,0	125,5	102,8	102,2	100,3	92,0	171,9	139,9

Průměrné hodnoty úhlů zotavení (tabulka č.3) byly vyneseny do grafu č.1, kde nejvyšší hodnoty úhlu zotavení dosahoval materiál Z7 (vlna) a nejnižší hodnoty úhlu zotavení materiál Z6 (len). Materiál Z7 vykazuje nárůst hodnoty úhlu zotavení oproti materiálu Z6 o 86,8%. Chování všech materiálů od 90 sekundy relaxace vykazuje lineární průběh nárůstu úhlu zotavení. Průměrná hodnota růstu úhlu zotavení byla 24,7 %.





Graf 1. Křivka zotavení textilií

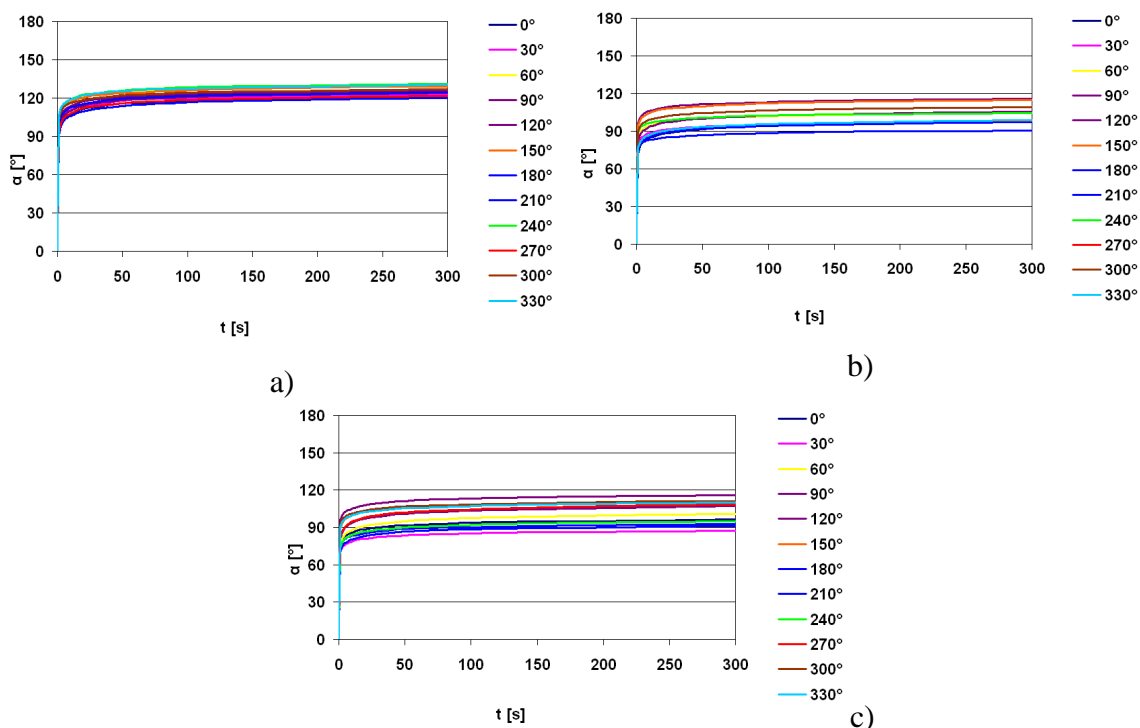
### 3.4 Vliv materiálového složení textilie na schopnost zotavení

Pro vliv materiálového složení byly doměřeny dodatkové parametry plošných textilií (tabulka 2). Byla naměřena, plošná hmotnost  $M_p$ , jemnost nití  $T$ , dostava a tloušťka materiálů  $h$ .

Materiály pro vyhodnocení vlivu materiálového složení byly rozděleny do třech skupin. První skupinu tvořily bavlněné materiály, druhou lněné materiály a třetí materiály z polyesteru, vlny a směsi bavlny a viskózy. Rozpětí úhlů zotavení bylo pro jednotlivé materiály vyjádřeno z úhlu zotavení ve třísté sekunde  $\alpha_{300}$ .

#### 3.4.1 Bavlněné materiály

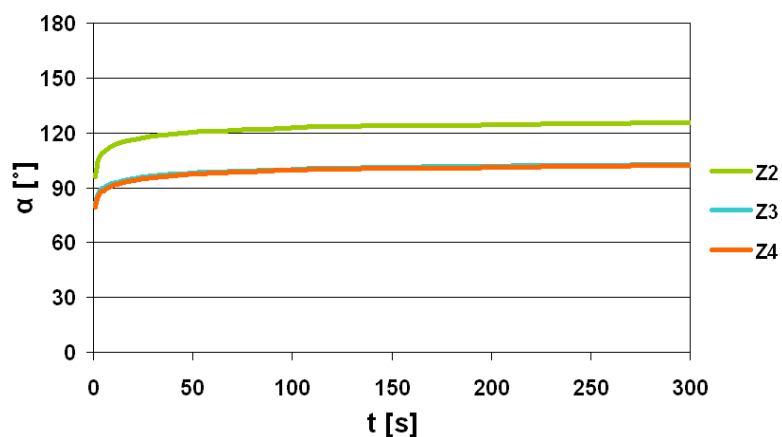
Bavlněné materiály byly označeny indexem Z2 - Z4. Jednotlivé grafy (2 a,b,c) obsahují 12 křivek, které představují jednotlivé úhly natočení materiálu. Materiál Z2 vykazuje izotropní chování vzhledem k úhlu natočení. Hodnoty úhlů zotavení v čase 300 sekund byly pro všechny směry pootočení v rozpětí  $11,1^\circ$ . Materiál Z2 vykazoval nejmenší úhel zotavení ve směru osnovy ( $180^\circ$ ) nejvyšší hodnoty dosahoval při úhlu natočení  $240^\circ$ . Vzorek stříhaný po osnově ( $180^\circ$ ) je nejvíce mačkový. Materiály Z3 (graf 2b) a Z4 (graf 2c) vykazují větší rozpětí mezi měřenými vzorky oproti materiálu Z2. Materiál Z3 dosahuje rozpětí úhlu zotavení  $25,2^\circ$ . Nejmenší hodnoty úhlu zotavení dosahoval vzorek pro úhel natočení  $210^\circ$  a největší pro  $120^\circ$ . Materiál Z4 vykazoval rozpětí  $28,56^\circ$ , kde nejmenší hodnotu dosahoval vzorek pro  $30^\circ$  a nejvyšší vzorek pro  $120^\circ$ . Materiály Z3 a Z4 dosahovali přibližně stejné anizotropie.



Graf 2. Úhel zotavení pro materiál a) Z2, b) Z3, c) Z4

V grafu 3 jsou vyneseny průměrné hodnoty úhlu zotavení pro bavlněné materiály (Z2-Z4). Materiály Z3 a Z4 vykazují podobné chování při měření úhlu zotavení a materiál Z2 vykazuje hodnoty úhlu zotavení o 22,4 % vyšší oproti Z3 a Z4.

Při celkovém pohledu na dodatkové rysy bavlněných materiálů (tabulka 2) bylo zjištěno, že jemnosti nití (osnovy a útku) dosahují shodných hodnot pro všechny bavlněné materiály a to průměrně 29,3 Tex. Domníváme se, že tento parametr nehraje významnou roli na výsledný úhel zotavení. Tloušťka materiálů dosahuje průměrné hodnoty 0,39 mm a rozdíly mezi jednotlivými materiály jsou zanedbatelné. Nejvíce ovlivňující faktor pro naměřené úhly zotavení je plošná hmotnost a dostava

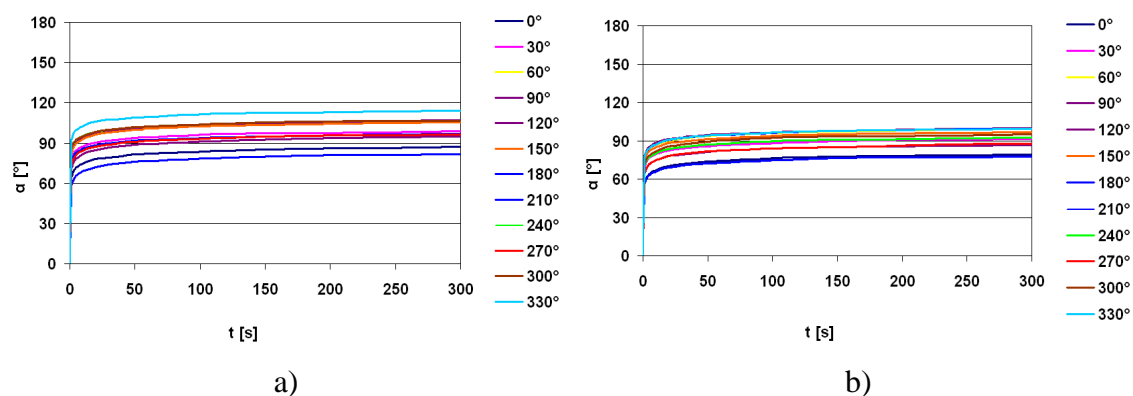


Graf 3. Průměrné hodnoty úhlů zotavení pro bavlněné materiály

### 3.4.2 Lněné materiály

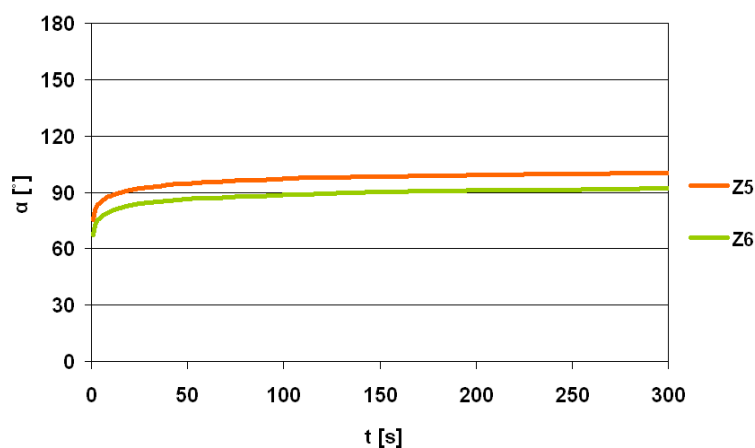
Lněné materiály byly označeny indexem Z5 a Z6. Materiály jsou plátňové vazby a naměřené hodnoty úhlů zotavení byly měřeny po dobu 300 sekund a následně vyneseny do grafů 4. Hodnoty úhlů zotavení se u materiálu Z5 pohybují v rozpětí  $32,1^\circ$ , kde nejnižší hodnotu úhlu zotavení vykazuje vzorek ve směru  $180^\circ$  a nejvyšší hodnoty úhlu zotavení pro směr vzorku  $330^\circ$ .

Nejvyšší hodnotu úhlu zotavení u materiálu Z6 (graf 3b) vykazuje vzorek pro směr  $180^\circ$  a nejnižší vzorek střižený ve směru  $120^\circ$  a hodnota rozpětí dosahuje  $22,1^\circ$ .



Graf 4. Úhel zotavení pro materiál a) Z5, b) Z6

Na grafu 5 jsou vyneseny všechny průměrné hodnoty úhlu zotavení pro lněné materiály Z5 a Z6. Materiál Z5 vykazuje o 9% vyšší hodnotu úhlu zotavení oproti materiálu Z6. Při celkovém pohledu na dodatkové rysy lněného materiálu (tabulka 2) bylo zjištěno, že jemnosti nití (osnovy a útku) dosahují rozdílných hodnot. Jemnost nití v osnově i útku byla u materiálu Z5 přibližně o 100% vyšší oproti materiálu Z6. Plošná hmotnost materiálu Z5 je o 1/3 vyšší oproti materiálu Z6. Mačkavost lněného materiálu je ovlivněna plošnou hmotností, tloušťkou a jemností.



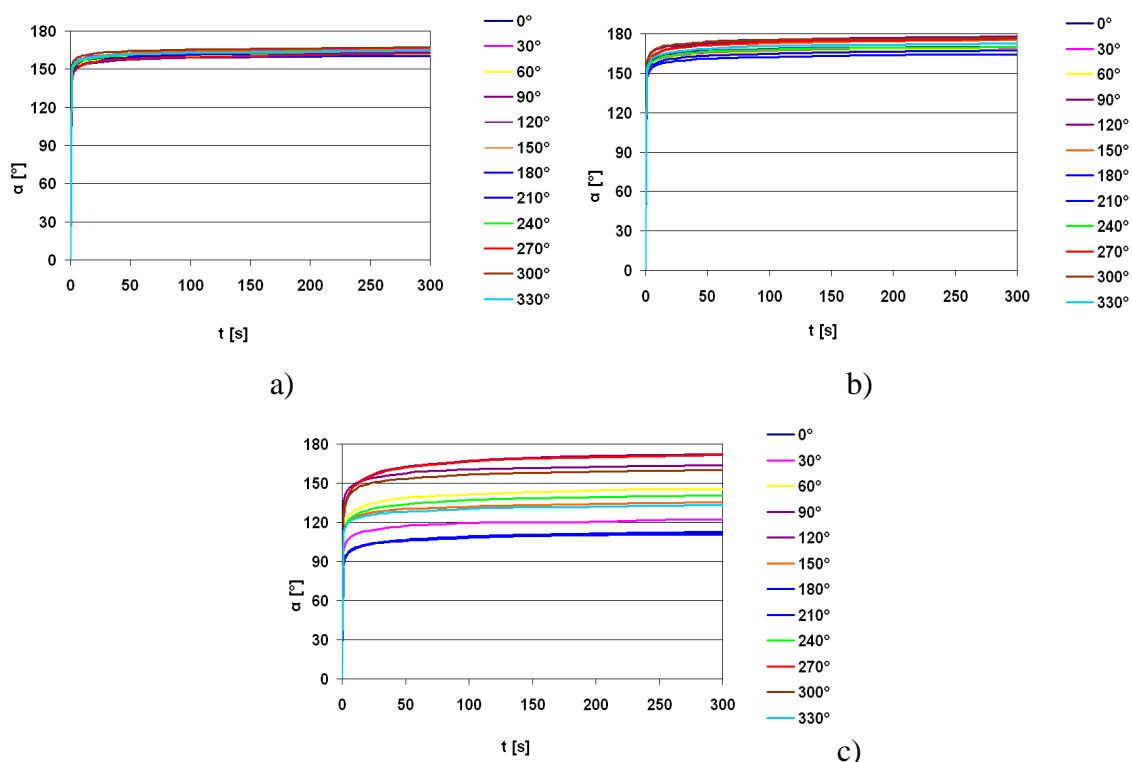
Graf 5. Průměrných hodnoty úhlů zotavení pro lněné materiály



### 3.4.3 Porovnání vlněného, polyesterového a směsového materiálu viskózy s bavlnou

V poslední skupině materiálů byl porovnán polyesterový materiál Z1, vlněný materiál Z7 a směs viskózy s bavlnou Z8. Naměřené hodnoty úhlů zotavení jsou vyneseny v grafech 6 a,b,c.

V grafu 6a je znázorněn polyesterový materiál Z1. a rozpětí naměřených hodnot mezi měřeními vzorky je zanedbatelné. Polyesterový materiál se chová izotropně. Rozpětí úhlů zotavení materiálu Z1 je  $6,5^\circ$  a hodnotu považujeme za nevýznamnou. Pro vlněný materiál Z7 (graf 6b) bylo v čase 300 sekund rozpětí vzorků  $12,8^\circ$ . Rozpětí hodnot úhlů zotavení dosahuje vzorek ve směru  $210^\circ$  a směru  $120^\circ$ . Materiál Z8 (graf 6c) vyroben ze směsi viskózy a bavlny dosahuje největšího rozpětí všech měřených vzorků. Anizotropie tohoto materiálu byla ze všech měřených materiálů nejvyšší což je především ovlivněno viskózovými vlákny v útku.. Rozpětí úhlů zotavení ve třísté sekunde je  $61,93^\circ$ . Pro materiál Z8 je nejnižší uhel zotavení shodný se vzorky Z1 a Z7. Nejvyšší uhel zotavení vykazuje materiál Z8 ve směru natočení  $90^\circ$ .

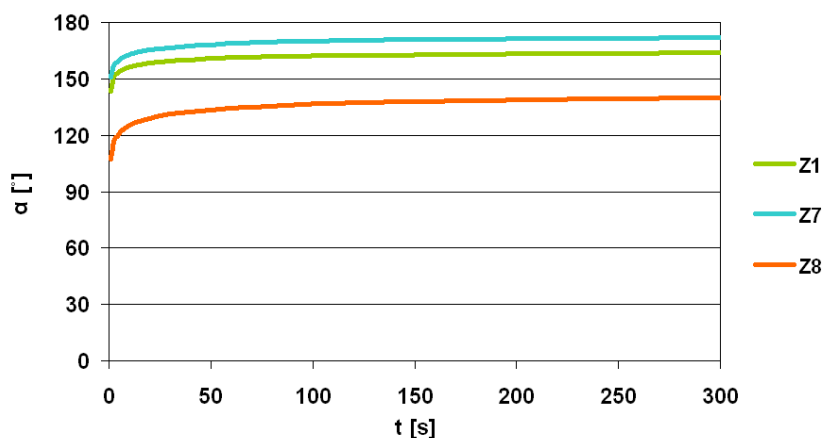


Graf 6. Znázornění relaxace vzorků a) Z1 b) Z7 c) Z8

Pro znázornění chování materiálů Z1, Z7 a Z8, byl vynesen graf 7 z průměrných hodnot úhlů zotavení.

Materiál Z1 vykazuje o 17,8 % vyšší hodnotu úhlu zotavení oproti materiálu Z8 a materiál Z7 vykazuje o 23,5 % vyšší hodnotu úhlu zotavení oproti materiálu Z8.

Vliv jednotlivých zkoumaných parametrů přímo nesouvisí se zjištěnými výsledky a materiály si nejsou podobné můžeme se domnívat, že při celkovém pohledu na dodatekové vlastnosti materiálů Z1, Z7 a Z8 (tabulka 2) bylo zjištěno, že největší roli při zotavení vzorků hraje pravděpodobně materiálové složení



Graf 7. Průměrné úhly zotavení pro vlnu, viskózu a polyester

### 3.5 Vyjádření podílu deformace

Jednotlivé deformace byly spočítány z naměřených hodnot úhlu zotavení. Důležité hodnoty úhlů zotavení pro vyjádření deformace jsou  $\alpha_0$ , což představuje první hodnotu po odlehčení závaží. Poslední snímání uhel je označen symbolem  $\alpha_{300}$  a vyjadřuje relaxace vzorku v čase 300 sekund. K určení elastické deformace  $\varepsilon_E$  byl použit vzorec 30, kde  $\alpha_0$  je první naměřená hodnota snímaného vzorku v čase zotavení první sekunde.

$$\varepsilon_E = \frac{\alpha_0}{180^\circ} \cdot 100 \quad (30)$$

Vyjádření viskoelastické deformace  $\varepsilon_v$  je vyjádřeno vzorcem 31, kde  $\alpha_{300}$  byla hodnota naměřená v čase zotavení 300 sekund.

$$\varepsilon_z = \frac{\alpha_{300} - \alpha_0}{180^\circ} \cdot 100 \quad (31)$$

Plastická deformace  $\varepsilon_P$  byla vyjádřena vztahem 32.

$$\varepsilon_P = \frac{180 - \alpha_{300}}{180^\circ} \cdot 100 \quad (32)$$

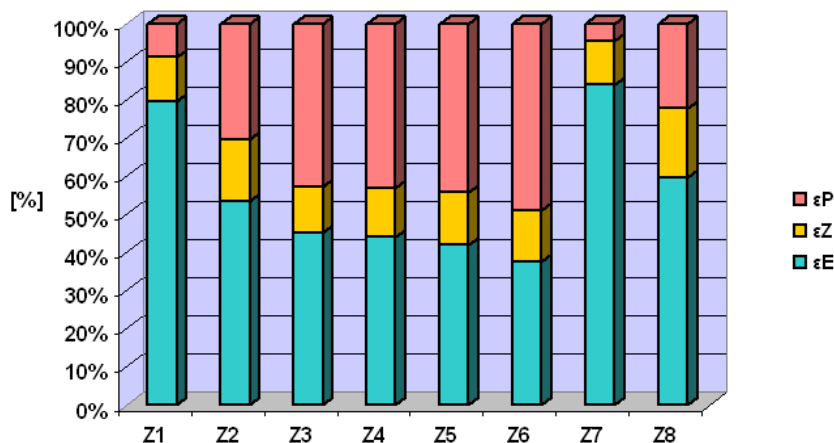
Pro vyjádření jednotlivých deformací byly použity průměrné hodnoty úhlů zotavení v první a třetí sekunde a společně s vypočtenou deformací jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4. Reálné a vypočítané hodnoty deformací

Materiál	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
$\varnothing \alpha_0 [^\circ]$	143,3	96,1	81,3	79,2	75,5	67,6	151,0	107,3
$\varnothing \alpha_{300} [^\circ]$	164,0	125,5	102,8	102,2	100,3	92,0	171,9	139,9
$\varepsilon_E [\%]$	79,6	53,4	45,1	44,0	41,9	37,5	83,9	59,6
$\varepsilon_V [\%]$	11,5	16,4	12,0	12,7	13,8	13,6	11,6	18,1
$\varepsilon_P [\%]$	8,9	30,3	42,9	43,2	44,3	48,9	4,5	22,3

Vyjádření podílu deformací popisuje chování materiálu. Z grafu 8 je patrné, že elastická deformace ovlivňuje materiál po odlehčení závaží. Následně se projeví viskoelastická deformace a nakonec plastická deformace.

Z vypočítaných hodnot byl vynesena graf 8, který vyjadřuje podíl jednotlivých deformací. Nejmenší hodnoty elastické deformace  $\varepsilon_E$  dosáhly lněné materiály Z5 a Z6. Nejvyšší hodnoty elastické deformace dosahují materiály Z1 a Z7. Vlněný materiál Z7 dosahuje hodnotu elastické deformace až 83,9%. Nejvyšší hodnoty (18,1%) viskoelastické deformace  $\varepsilon_Z$  dosáhl materiál Z8 (viskóza). Ostatní materiály dosáhly přibližně shodné viskoelastické deformace (12%). Materiál Z6 dosáhl nejvyšší hodnoty plastické deformace  $\varepsilon_P$  48,9%. Při porovnání s materiálem Z7 byla tato hodnota přibližně 11 krát vyšší. Materiál s vyšší elastickou deformací je méně mačkový, protože materiál s vysokou hodnotou elastické deformace vykazuje nižší schopnost dosáhnout plastické deformace.



Graf 8. Vyjádření plastické, viskoelastické a elastické deformace

### 3.6 Modelování průběhu deformace pomocí reologického modelu

Abychom mohli aproximovat průběh deformace pomocí reologického modelu, museli jsme vyjádřit průběh deformace, která vznikla při zatížení vzorku.

Mačkavost v textiliích byla vyjádřena trvalou deformací a vznikla během zatížení závažím. Deformace byla vyjádřena vztahem 33 na základě experimentálně zjištěného úhlu zotavení.

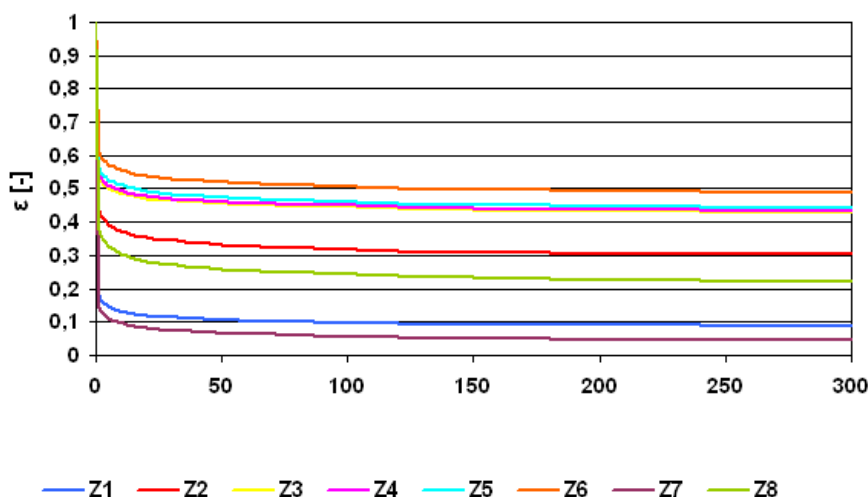
$$\varepsilon(t) = 1 - \frac{\bar{\alpha}(t)}{180^\circ} [-] \quad (33)$$

Průměrné hodnoty úhlu zotavení byly vyneseny do tabulky č. 3 a v tabulce č. 5 byly vyjádřeny analyticky vyjádřené hodnoty deformace a následně vyneseny do grafu 9.

Tabulka 5. Analyticky vyjádřená deformace

materiál	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
t [s]	$\varepsilon[-]$	$\varepsilon[-]$	$\varepsilon[-]$	$\varepsilon[-]$	$\varepsilon[-]$	$\varepsilon[-]$	$\varepsilon[-]$	$\varepsilon[-]$
0	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0,204	0,466	0,549	0,560	0,581	0,625	0,161	0,404
2	0,170	0,425	0,523	0,533	0,553	0,598	0,135	0,364
3	0,157	0,409	0,512	0,522	0,540	0,586	0,123	0,347
4	0,150	0,399	0,506	0,514	0,533	0,578	0,116	0,336
5	0,145	0,392	0,501	0,509	0,527	0,573	0,111	0,328
6	0,141	0,386	0,497	0,505	0,523	0,569	0,107	0,322
7	0,138	0,382	0,494	0,502	0,519	0,565	0,103	0,317
8	0,136	0,378	0,491	0,498	0,516	0,561	0,100	0,312
9	0,133	0,375	0,488	0,496	0,513	0,559	0,097	0,309
10	0,131	0,371	0,486	0,493	0,511	0,556	0,095	0,305
15	0,125	0,360	0,477	0,484	0,500	0,546	0,086	0,291
20	0,121	0,353	0,472	0,479	0,494	0,539	0,082	0,283
25	0,117	0,348	0,467	0,474	0,489	0,534	0,078	0,276
30	0,115	0,344	0,464	0,470	0,485	0,530	0,075	0,271
35	0,112	0,340	0,461	0,467	0,481	0,527	0,072	0,267
40	0,110	0,337	0,459	0,464	0,478	0,524	0,069	0,263
45	0,108	0,334	0,457	0,461	0,476	0,522	0,067	0,261
50	0,107	0,332	0,455	0,459	0,474	0,520	0,066	0,258
55	0,105	0,329	0,453	0,458	0,472	0,518	0,064	0,255
60	0,104	0,328	0,452	0,456	0,470	0,516	0,063	0,253
120	0,098	0,316	0,440	0,445	0,457	0,503	0,054	0,237
180	0,094	0,310	0,435	0,440	0,450	0,496	0,050	0,231
240	0,091	0,305	0,431	0,436	0,446	0,492	0,047	0,226
300	0,089	0,303	0,429	0,432	0,443	0,489	0,045	0,223

Deformace je závislá na čase a je definována křivkou zotavení plošné textilie. Grafický popis deformace  $\varepsilon$  se nachází v intervalu (0,1) a vyjadřuje míru mačkovosti zkoumaných materiálů. Hodnota naměřená v první sekundě doby relaxace vyjadřuje elastickou deformaci a hodnoty, které byly naměřeny v 300 sekunde vyjadřují plastickou deformaci. V grafu 9 je viditelný průběh viskoelastické deformace a podle vzniklé deformace můžeme tvrdit, že nejvíce mačkový materiál je Z6 (len) a nejméně mačkový Z7 (vlna).

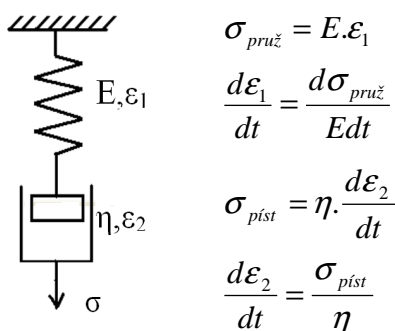


Graf 9. Křivka průběhu deformace textilií

### 3.6.1 Modelování průběhu deformace pomocí Maxwellova modelu

Pro pochopení chování plošných textilií při jejich zatížení a následném odlehčení jsme provedli aproximaci experimentální křivky úhlů zotavení pomocí Maxwellova reologického modelu.

Maxwellův reologický model (obrázek 35) je schopen předpovídat elastické a viskózní chování materiálů. Návrh aproximace křivky zotavení pomocí reologických modelů ve své práci navrhuje Zelová [17].



Obrázek 35. Maxwellův model

Pro vyjádření modulu pružnosti  $E$  byla použita rovnice 34,

$$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1 \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon_1} [Pa] \quad (34)$$

kde  $E$  je modul pružnosti,  $\varepsilon_1$  je deformace vyjádřená pomocí vztahu 33. Vzorek byl zatížen závažím o hmotnosti  $1kg$  a na vzorek bylo působeno napětím  $\sigma$  50 kPa.

Z rovnice 35 jsme vyjádřili viskozitu  $\eta$ ,

$$\sigma_2 = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = \eta \frac{\varepsilon}{t} \Rightarrow \eta = \frac{\sigma}{\varepsilon_{300}} \cdot t [Pa.s] \quad (35)$$

kde  $\varepsilon_{300}$  vyjadřuje deformaci, která byla analyticky vypočítaná podle vzorce 33.

Z plastické deformace (vzorec 36) byla vyjádřena deformace Maxwellovým reologickým modelem.

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma}{\eta} \cdot t \quad (36)$$

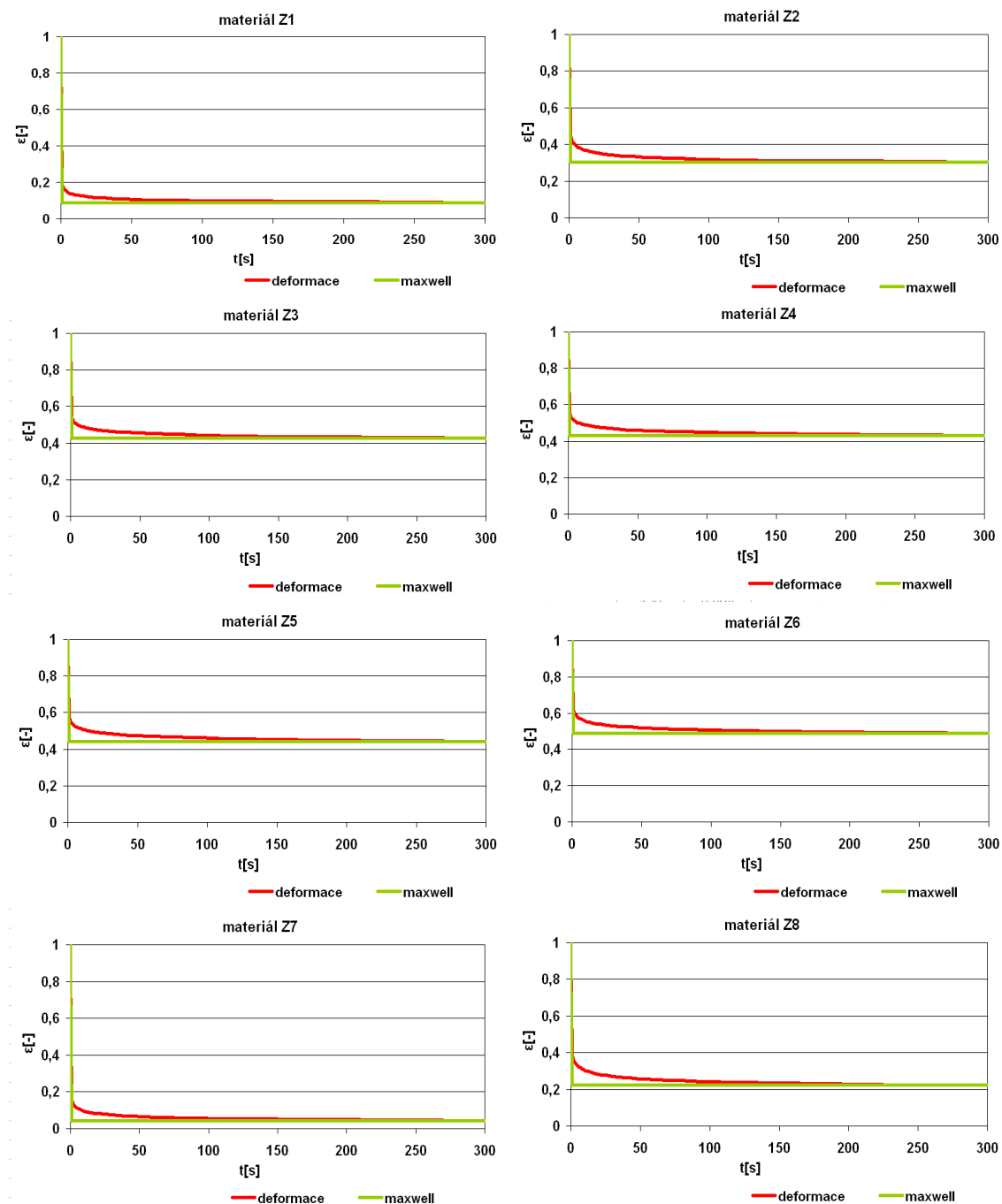
V tabulce 6 byly uvedeny vypočítané hodnoty modulu pružnosti  $E$ , viskozity  $\eta$  a hodnoty deformací průměrných úhlů zotavení z první a třísté sekunde doby relaxace.

*Tabulka 6. Naměřené a vypočítané hodnoty potřebné pro vyjádření modulu pružnosti a viskozity pro Maxwellův model*

<b>Materiál</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	<b>Z4</b>	<b>Z5</b>	<b>Z6</b>	<b>Z7</b>	<b>Z8</b>
<b><math>\alpha_1</math> [°]</b>	143,3	96,1	81,3	79,2	75,5	67,6	151	107,3
<b><math>\alpha_{300}</math> [°]</b>	164	125,5	102,8	102,2	100,3	92	171,9	139,9
<b><math>\varepsilon_1</math> [-]</b>	0,204	0,466	0,549	0,56	0,581	0,625	0,161	0,404
<b><math>\varepsilon_{300}</math> [-]</b>	0,089	0,303	0,429	0,432	0,443	0,489	0,045	0,223
<b><math>\varepsilon_e</math> [-]</b>	0,796	0,534	0,451	0,44	0,419	0,375	0,839	0,596
<b><math>\varepsilon_p</math> [-]</b>	0,089	0,303	0,429	0,432	0,443	0,489	0,045	0,223
<b><math>\varepsilon_v</math> [-]</b>	0,115	0,164	0,12	0,127	0,138	0,136	0,116	0,181
<b><math>\varepsilon_c</math> [-]</b>	1	1	1	1	1	1	1	1
<b><math>E</math> [Pa.10<sup>-3</sup>]</b>	62,82	93,66	110,76	113,61	119,28	133,22	59,61	83,91
<b><math>\eta</math> [Pa.s.10<sup>-6</sup>]</b>	168,74	49,58	34,99	34,68	33,86	30,68	33,36	67,37

V grafu 10 byly vyneseny analyticky vyjádřené hodnoty aproximace a deformace vyjádřené pomocí Maxwellova reologického modelu. Deformační křivka byla vyjádřena z naměřených hodnot úhlů zotavení podle vztahu 33. Maxwellův reologický model popisuje elastickou a plastickou deformaci. Při natažení pružiny vznikne elastická deformace a po odlehčení pružiny dojde k brždění pomocí pístu, který

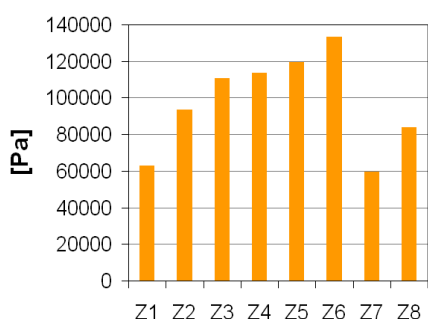
vyjadřuje plastickou deformaci. Vzniklá plastická deformace zůstává v průběhu zotavení konstantní. Z grafu 10 je patrné, že Maxwellův reologický model nepopisuje reálnou viskoelastickou deformaci, která je vyjádřena relaxací úhlu zotavení.



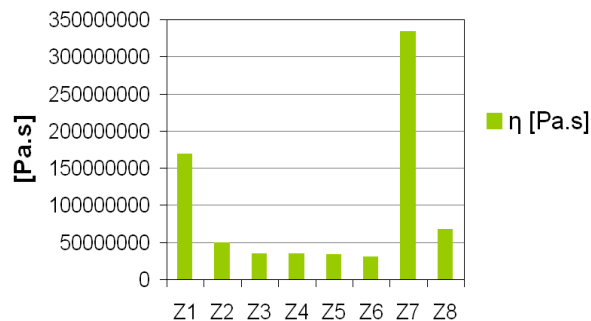
Graf 10. Aproximace křivky zotavení (Maxwellův model) pro všechny materiály

Pomocí vzorce 34 byl vyjádřen modul pružnosti  $E$  (graf 11), který byl vypočítán z elastické deformace  $\epsilon_E$  a napětí  $\sigma$ . Modul pružnosti představuje tuhost pružného elementu a platí závislost, že čím větší je elastická deformace tím menší je hodnota tuhosti modulu pružnosti.

Vyjádření viskozity  $\eta$  bylo pro všechny materiály znázorněno v grafu 12. Viskozita byla vyjádřena pomocí vzorce 35 a úzce souvisí s plastickou deformací. Viskozita vyjadřuje tření viskózního prvku. Čím větší bude třetí tím bude větší zpomalení zotavení materiálu.



Graf 11. Modul pružnosti

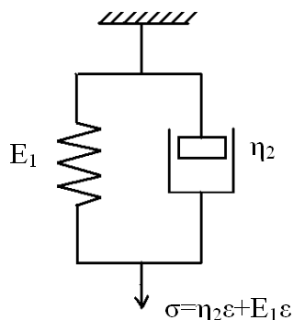


Graf 12. Viskozita

### 3.6.2 Modelování průběhu deformace pomocí Kelvinova modelu

Pro lepší popis chování plošných textilií při jejich zatížení a následném odlehčení jsme také provedli aproximaci experimentální křivky úhlů zotavení pomocí Kelvinova reologického modelu.

Kelvinův model (obrázek 36) je schopen předpovídat viskoelastickou deformaci plošných textilií. Teoretické poznatky byly získány z konzultací Zelové



Obrázek 36. Kelvinův model

Kelvinův model je znázorněn paralelním uspořádáním pístu  $\eta_2$  a pružiny  $E_1$ . Ze základních rovnic reologických modelů byly vyjádřeny všechny proměnné, které jsou uvedeny v tabulce 7. Pro vyjádření časové konstanty  $X$  byl použit vzorec 37,

$$X = \frac{E}{\eta} = \frac{1}{t_{(2)} - t_{(10)}} \ln \frac{\varepsilon_{(2)}}{\varepsilon_{(10)}} \quad (37)$$

kde  $t_{(2)}$  a  $t_{(10)}$  jsou úhly zotavení v druhé a desáté sekunde a  $\varepsilon_{(2)}$  a  $\varepsilon_{(10)}$  je analyticky vyjádřena deformace podle vzorce (33).



Z rovnice 38 byl dopočítán modul pružnosti  $E$ ,

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_v} \cdot (1 - \exp(-X \cdot t_z)) \quad (38)$$

kde  $\varepsilon_v$  je viskoelastická deformace,  $X$  časová konstanta a  $t_z$  čas zatížení vzorku (300 sekund).

Viskozita  $\eta$  byla vyjádřena vztahem (39)

$$\eta = \frac{E}{X} \quad (39)$$

Deformace  $\varepsilon(t)$  byla podle Kelvinova reologického modelu vyjádřena pomocí vztahu 40 a je závislá na čase.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} \cdot \exp\left(-\frac{E}{\eta} \cdot t\right) \quad (40)$$

V příloze 3 jsou uvedeny hodnoty deformace pomocí Kelvinova reologického modelu.

*Tabulka 7. Naměřené a vypočítané hodnoty potřebné pro vyjádření modulu pružnosti a viskozity pro Kelvinův model*

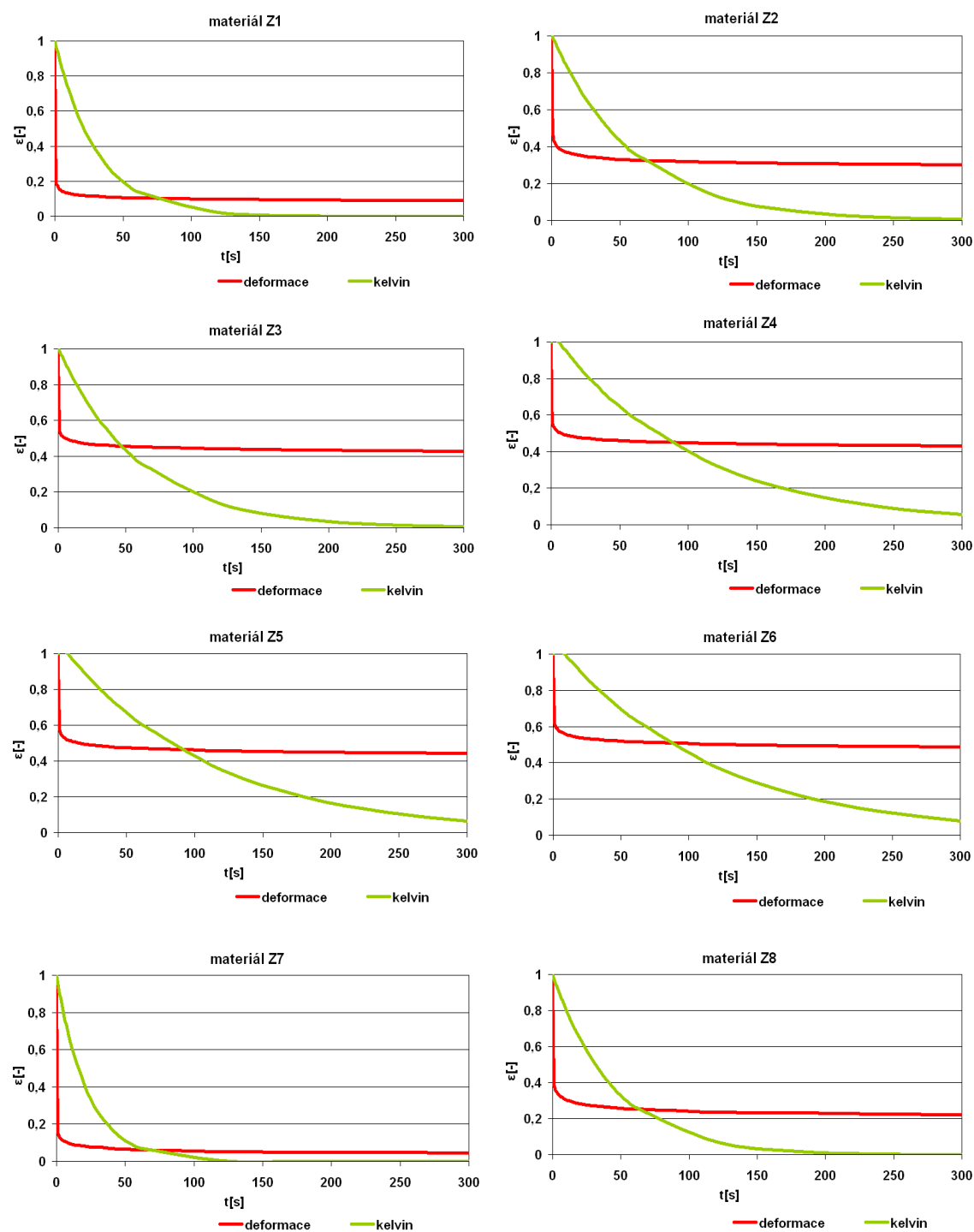
<b>Materiál</b>	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>	<b>Z3</b>	<b>Z4</b>	<b>Z5</b>	<b>Z6</b>	<b>Z7</b>	<b>Z8</b>
<b><math>\alpha_2</math> [°]</b>	149,4	103,5	85,8	84,0	80,5	72,3	155,6	114,5
<b><math>\alpha_{10}</math> [°]</b>	156,4	113,1	92,5	91,3	88,1	79,9	162,8	125,1
<b><math>\varepsilon_2</math> [-]</b>	0,170	0,425	0,523	0,533	0,553	0,598	0,135	0,364
<b><math>\varepsilon_{10}</math> [-]</b>	0,131	0,371	0,486	0,493	0,511	0,556	0,095	0,305
<b><math>\varepsilon_e</math> [-]</b>	0,796	0,534	0,451	0,44	0,419	0,375	0,839	0,596
<b><math>\varepsilon_p</math> [-]</b>	0,089	0,303	0,429	0,432	0,443	0,489	0,045	0,223
<b><math>\varepsilon_v</math> [-]</b>	0,115	0,164	0,12	0,127	0,138	0,136	0,116	0,181
<b><math>\varepsilon_c</math> [-]</b>	1	1	1	1	1	1	1	1
<b><math>E</math> [Pa.10<sup>-3</sup>]</b>	49,99	49,68	46,91	47,38	46,90	46,40	50,00	49,94
<b><math>\eta</math> [Pa.s.10<sup>-6</sup>]</b>	1,54	2,94	5,05	4,82	5,06	5,29	1,14	2,25

Při paralelním spojení pružiny a pístu je přechod pružiny z jednoho deformačního stavu do druhého zpoždován viskózním prvkem. Kelvinův model se deformuje vratně, jeho elasticita není okamžitá, ale časově závislá.

V grafu 10 byly vyneseny analyticky vyjádřené hodnoty aproximace a deformace vyjádřené pomocí Kelvinova reologického modelu. Kelvinův reologický model popisuje viskoelastickou deformaci.

Z grafu 9 a 10 je patrné, že průběhy predikovaných reologických modelů nejsou ideální pro vyjádření chování celé deformace plošných textilií. V ideálním případě by bylo popsáno chování (elastické, viskoelastické a plastické) deformace textilních

materiálů jedním reologickým modelem. Kombinací maxwelova a kelvinova reologického modelu by bylo možné dosáhnout lepšího průběhu deformace.



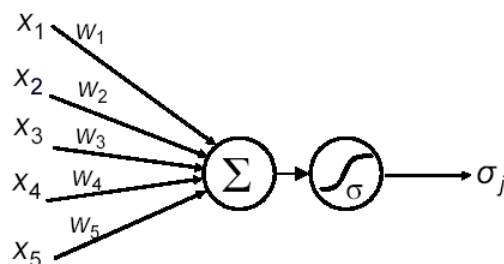
Graf 13. Aproximace křivky zotavení (Kelvinův model) pro všechny materiály

### 3.7 Využití neuronových sítí pro predikci mačkovosti

Technologie umělých neuronových sítí je relativně mladá. Neuronovým sítím (dále jen NS) se věnuje umělá, nebo výpočtová inteligence. NS je možné definovat jako masivně paralelní výpočtový systém, který má schopnost uchovávání informací a umožňuje jejich další zpracování. Napodobňuje lidský mozek sběrem a uchováním poznatků v procese učení [20].

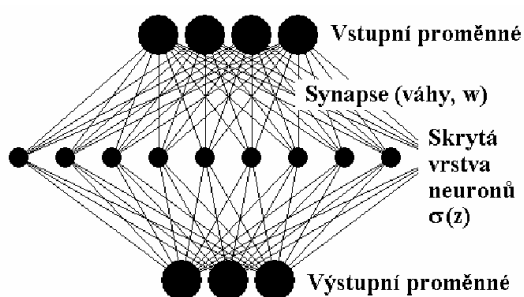
Hlavní výhodou NS je schopnost učit se. NS jsou modelem kybernetické černé skříňky, která je schopna přiřadit vstupním signálům adekvátní výstupy bez ohledu na jejich vnitřní strukturu.

Základním prvkem NS je neuron (obrázek 37). Obecně obsahuje několik vstupů od ostatních neuronů, nebo z okolního prostředí a obsahuje jeden výstup.

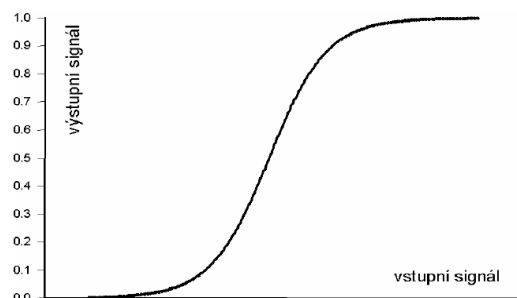


Obrázek 37. Schéma umělého neuronu [22]

Složitá činnost NS spočívá ve spojení mnoha jednoduchých elementů v celek. V převážné většině sítí jsou neurony uspořádány do vrstev (obrázek 38), z kterých vznikne aktivační funkce neuronu (obrázek 39). Tento přístup značně usnadňuje programovou implementaci a umožňuje matematický popis činnosti NS [21].



Obrázek 38. Schéma neuronové sítě [22]



Obrázek 39. Aktivační funkce neuronu [22]

### 3.7.1 Postup zadávání neuronových sítí

- Zvolíme skupinu nezávisle proměnných, o kterých se domníváme, že mohou mít vliv na závisle proměnné. Zvolíme skupinu závisle proměnných, na něž mají mít vliv nezávisle proměnné. V každém řádku musí být vždy hodnoty závisle i nezávisle proměnné, které si odpovídají.
- Určíme architekturu neuronové sítě (počet vrstev a počty neuronů v jednotlivých vrstvách). Neexistuje jednoznačné pravidlo pro nejlepší architekturu sítě, obvykle je vhodné používat počet neuronů zhruba odpovídající počtu proměnných.
- Optimalizace parametrů sítě, neboli tzv. „učení“ neuronové sítě. Během tohoto procesu se optimalizační algoritmus snaží najít nastavení vah, aby síť předpovídala hodnoty v co nejlepším souladu se zadanými proměnnými [22].
- Podrobný postup použití neuronové sítě je přiložen v příloze 4.

### 3.7.2 Zpracování neuronových sítí

Pro experimentální vyhodnocení neuronových sítí byly zvolené závislé a nezávislé proměnné.

- **nezávisle proměnné** jsou zvolené jako charakteristiky materiálů (plošná hmotnost, jemnost nití, dostava a tloušťka)
- **závislé proměnné** jsou zvolené jako naměřené hodnoty úhlu zotavení

V experimentu byl naměřen úhel zotavení v 24 časech. Při zpracování NS byly závislé proměnné použité časy relaxace v 1,5,10,180 a 300 sekunde. Bylo vyzkoušeno víc možností, abychom jsme zjistili co nejlepší predikce. Nejdřív byl zvolen úhel zotavení snímáný v první a ve třetí sekunde. Při volbě architektury neuronové sítě byly zvoleny 2 vrstvy. Počet neuronu byl nejprve zvolen 5-3 a později 7-4. Na základě této změny byl zjišťován optimální počet neuronů.

Úspěšnost neuronové sítě byla posouzena podle:

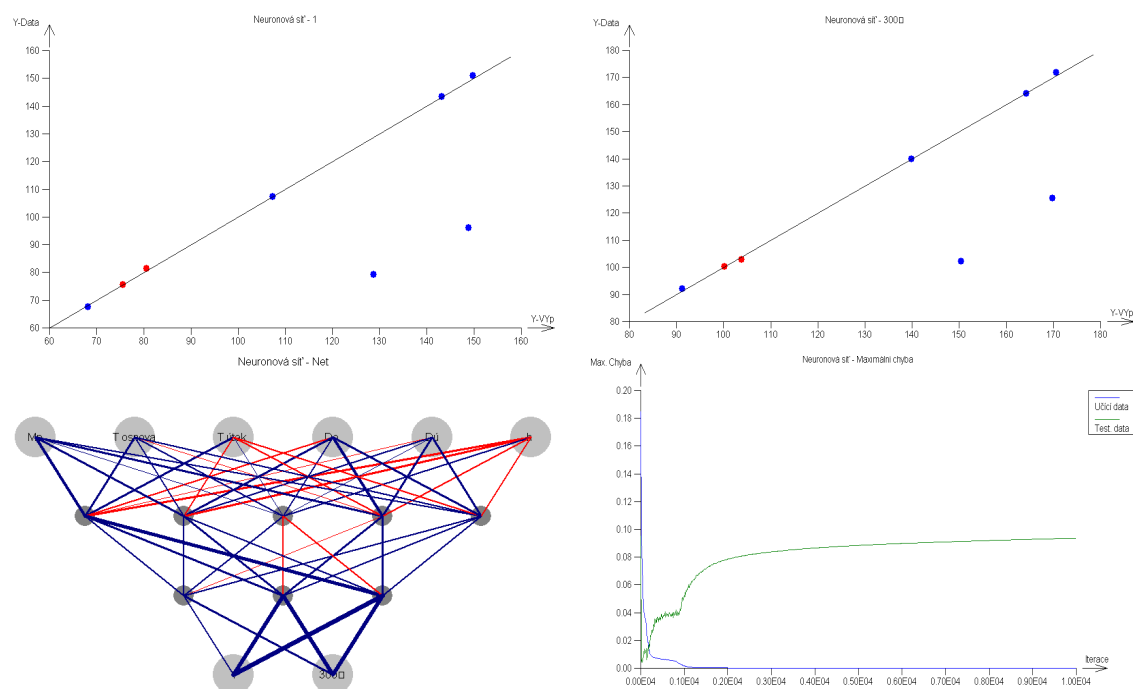
- průběhu poklesu kritéria součtu čtverců
- proložení v grafech predikce závisle proměnných
- tloušťky úseček spojujících neurony.

Na grafu 14 je znázorněna neuronová síť pro závislé hodnoty v první a třetí sekunde úhlu zotavení.

Na prvním a druhém grafu je znázorněn průběh poklesu kritéria součtu čtverců. Na třetím grafu jsou zobrazeny vstupní nezávislé proměnné (charakteristiky materiálů), počet vrstev NS (2), počet neuronu v jednotlivých vrstvách (5-3) a závislé proměnné

(1,300). Podle těsnosti v grafů a podle tloušťky úseček spojujících neurony je viditelná závislost jednotlivých proměnných. Poslední graf určuje predikční schopnost proměnných.

V našem případě byla predikční schopnost nevhodná. Pravděpodobně to bylo způsobeno nedostatkem vstupních parametrů, nebo komplikovanými závislostmi. Další měřené způsoby neuronových sítí jsou uvedeny v příloze 5.



*Graf 14. Grafy popisující neuronové sítě, počet neuronu 5-3, kde nezávislé proměnné byly všechny charakteristické hodnoty a závislé proměnné naměřené úhly zotavení v čase 1 a 300 sekund.*

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zkoumat a analyzovat tvarovou stálost plošných textilií pomocí inovované objektivní metody, která byla založena na snímání úhlu zotavení. Mačkavost textilií byla vyjádřena prostřednictvím trvalých deformací a pomocí reologického modelu byl simulován průběh deformace, která vzniká v textiliích.

V teoretické části diplomové práce byla zpracována rešerše zaměřena na reologii a využití reologických modelů pro modelování vlastností textilií. Byla analyzována mačkavost plošných textilií a byly popsány jednotlivé typy deformací, které vznikají v průběhu mačkaní plošné textilie

Pro experiment bylo zvoleno 8 materiálů s podobnými vlastnostmi. Materiály byly tkané v plátňové vazbě a vyrobeny z přízí bavlny, lnu, polyesteru, vlny a směsi viskózy a bavlny. Pro objektivní inovovanou metodu snímání úhlu zotavení byl zvolen nový půlkruhový tvar vzorků, kterým bylo možné nasnímat úhel zotavení ve směru osnovy, útku a v dalších směrech. Pro experiment bylo zvoleno 12 poloh natočení vzorku. Pomocí novému tvaru vzorků bylo možné nasimulovat přesnější mačkaní plošných textilií.

Každý snímaný vzorek byl pozorován pomocí web kamery, která dokáže zachytit úhel zotavení v každé měřené sekundě. Úhel zotavení byl snímán po dobu 300 sekund od sejmutí závaží. Nasnímané úhly zotavení byly naměřeny v programu NIS Elements.

Z experimentálních výsledků bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty úhlu zotavení dosahoval materiál Z7 (vlna) a nejnižší hodnoty úhlu zotavení dosahoval materiál Z6 (len). Materiál Z7 vykazoval nárůst hodnoty úhlu zotavení oproti materiálu Z6 o 86,8%. Ostatní vzorky dosahovaly průměrného nárůstu hodnoty úhlu zotavení o 24,7 %. Faktor, který nejvíce ovlivňoval úhel zotavení u bavlněných materiálů byla plošná hmotnost, dostava osnovy a útku. Lněné materiály pravděpodobně nejvíce ovlivnila plošná hmotnost, tloušťka materiálu a jemnost nití a ostatní materiály nebylo možné porovnat pomocí charakteristických vlastností, jelikož materiály byly rozdílné z pohledu materiálového složení. Od 90 sekundy úhlu zotavení dosahovaly materiály lineární průběh relaxace.

Pro všechny materiály byla analyticky vyjádřena deformace z naměřených úhlů zotavení. Materiál s vyšší elastickou deformací byl méně mačkový

a materiál s vysokou hodnotou elastické deformace vykazoval nižší plastickou deformaci. Při relaxaci vykazují materiály s vyšší hodnotou úhlu zotavení nižší mačkavost.

V experimentu byla provedena aproximace experimentální křivky úhlů zotavení pomocí Maxwellova a Kelvinova reologického modelu. Maxwellův reologický model vyjadřuje odlehčení pružiny, která vyskočí (elastická deformace) a zastaví se na deformaci, která vznikla pomocí pístu (plastická deformace). Kelvinův reologický model je uspořádán paralelně a vystihuje průběh viskoelastické deformace. Chování deformace textilních materiálů není možné popsat pouze Kelvinovým, nebo Maxwellovým modelem a proto navrhuji provést aproximaci pomocí kombinace obou modelů.

Pomocí neuronových sítí byl prověřen nový způsob interpretace aproximace experimentální křivky úhlu zotavení. Počet zadaných hodnot pro zjištění predikce pomocí NS byl nízký a proto navrhuji, aby proběhlo naměření většího počtu charakteristických vlastností jako je například ohybová tuhost, smyk, které by lépe předpovídali chování úhlu zotavení. Bylo by možné vyhodnotit predikce mačkavosti, nebo splývavosti materiálu na vstupních charakteristických vlastnostech.

## Literatura

- [1] Raja Zaouali, Slah Msahli, Faouzi Sakli, Parameters influencing fabrics wrinkling [online]. August 2007, [cit.10.4.2011]. URL<<http://www.indiantextilejournal.com/articles/FAdetails.asp?id=502>>
- [2] ČSN 80 0819. Zkoušení mačkovosti plošných textilií. Praha: Český normalizační institut, 1994. Zrušená norma. Platnost ukončena v červnu 1994.
- [3] Zelová, K., Fridrichová, L. innovated method of measuring the crease recovery angles of textiles, STRUTEX (Structure and structural mechanics of textile fabrics). Liberec: TUL, 2009.
- [4] Tatsuki Matsuo, Crease and Elastic Recovery of Fibers [online]. October 2006 [cit. 10.4.2011] URL <[http://www.journalarchive.jst.go.jp/english/jnlabstract\\_en.php?cdjournal=jte1955&cdvol=10&noissue=1&startpage=37](http://www.journalarchive.jst.go.jp/english/jnlabstract_en.php?cdjournal=jte1955&cdvol=10&noissue=1&startpage=37)>
- [5] Xia Dong, A study on the relaxation behavior of fabric's crease recovery angle, [online]. July 2002 [cit. 10.4.2011] URL <<http://www.deepdyve.com/lp/emerald-publishing/a-study-on-the-relaxation-behavior-of-fabric-s-crease-recovery-angle-0z5LYZdPmI>>
- [6] Fengjun Shi, Youjiang Wang, Modellig crease recovery behaviour of woven fabrics, [online]. 1. June. 2007, [cit. 10.4.2011], URL <<http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all~content=a795346591~frm=abslink>>
- [7] Naima Halleb; Sami Ben Amar, Model modification and prediction of mechanical behaviour of fabrics in uniaxial tension, [online]. August 2010 [cit. 10.4.2011] URL <[http://www.informaworld.com/smpp/content~content=a924698210~db=all~jump\\_type=rss](http://www.informaworld.com/smpp/content~content=a924698210~db=all~jump_type=rss)>
- [8] ZILVAR V., MEISSNER B., *Fyzika polymerů*, Praha 1987
- [9] Stanovení dynamické viskozity kapalin, [online] [cit. 27.4.2011] URL <<http://fyzika.ft.utb.cz/ucebni/fyzika2/lab/10viskozita.pdf>>
- [10] SOBOTKA Z., *Reologie hmot a konstrukcí*, Akademie Praha, 1981
- [11] KOŠKOVÁ, B., *Struktura a vlastnosti vláken*, Liberec: VŠST, 1989
- [12] KOVÁŘ R., *Struktura a vlastnosti plošných textilií*, TUL v Liberci 2002
- [13] Fyzika, [online] [cit. 27.4.2011] URL <[http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika\\_pol/FP\\_10.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_10.pdf)>
- [14] Fyzika, [online] [cit. 27.4.2011] URL



- < [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env\\_fyzika/EF\\_06.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_06.pdf)>
- [15] STANĚK J., *Nauka o textilních materiálech díl 1*, VŠST v Liberci, 1988
- [16] KOVAČIČ V., *Zkoušení textilií*. Vysokoškolské skriptu, FT TUL, Liberec  
[cit.17.4.2011] URL <<http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060302/ztpb.pdf>>
- [17] ZELOVÁ, K.: *Predikce křivky zotavení plošné textilie pomocí reologického modelu*. Seminář doktorandů. TU Liberec, 2010.
- [18] ZOŠŠÁKOVÁ J.: *Sledování chování plošných textilií při tvarování a vlivu vazby na ohybovou deformaci textile*, Bakalářská práce TUL, 2008
- [19] DAVÍDKOVÁ B.: *Vliv struktury textilií na tvarovou stálost plošných textilií*, Bakalářská práce TUL, 2010
- [20] Neuronové sítě [online] [cit.4.5.2011] URL  
<[http://kiwiki.fmtnuni.sk/mediawiki/index.php/Neur%C3%B3nov%C3%A9\\_siete](http://kiwiki.fmtnuni.sk/mediawiki/index.php/Neur%C3%B3nov%C3%A9_siete)>
- [21] Neuronové sítě [online] [cit.4.5.2011] URL  
<<http://www.root.cz/clanky/neuronove-siete-su-ciernou-skrinkou/>>
- [22] KRUPKA K.: *Uživatelský manuál*, QC.Expert. Pardubice 2007

## Seznam obrázků

Obrázek 1.	Obdélníkový vzorek -----	12
Obrázek 2.	Půlkruhový vzorek-----	12
Obrázek 3.	Tvar ohybu v útku a osnovy-----	13
Obrázek 4.	Reologické zobrazení materiálu-----	13
Obrázek 5.	Bugersův model-----	14
Obrázek 6.	Test mačkovosti [6] -----	15
Obrázek 7.	Reologický model vzorku-----	15
Obrázek 8.	Reologický model Halleb[7]-----	16
Obrázek 9.	Závislost napětí a deformace -----	16
Obrázek 10.	Zjednodušený schéma modelovací metodiky -----	17
Obrázek 11.	Křivka deformace -----	17
Obrázek 12.	Pružina-----	21
Obrázek 13.	Závislost napětí ne deformaci pro pružný člen-----	21
Obrázek 14.	Píst-----	22
Obrázek 15.	Deformace pístu -----	22
Obrázek 16.	Destičky-----	22
Obrázek 17.	Závislost napětí na deformaci pro plastický člen -----	22
Obrázek 18.	Maxwellův model-----	23
Obrázek 19.	Maxwellův model a schématické znázornění relaxačního pokusu -----	24
Obrázek 20.	Zatížení a relaxace u Maxwellova modelu -----	24
Obrázek 21.	Kelvinův model -----	25
Obrázek 22.	Deformační odezva při Kelvinovom reologickom modelu-----	25
Obrázek 23.	Tuckertův model -----	26
Obrázek 24.	Vztah mezi napětím a deformací viskoelastické látky -----	26
Obrázek 25.	Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání u viskoelastických materiálů -----	27
Obrázek 26.	Experiment krípu a zpětného krípu na nelineární viskoelastické látce a) časový průběh napětí, b) časový průběh deformace-----	28
Obrázek 27.	Měření úhlu zotavení textilie a) původní stav b) zatížení c) relaxace vzorku[17]-----	29
Obrázek 28.	Křivka průběhu deformace proužku textilie -----	29
Obrázek 29.	Křivka zotavení textilií [17]-----	31

Obrázek 30.	Schématické znázornění mačkání vzorku -----	31
Obrázek 31.	Materiály použité při experimente -----	34
Obrázek 32.	Měřicí zařízení -----	34
Obrázek 33.	Příprava vzorků [19] -----	35
Obrázek 34.	Program Nis Elements -----	36
Obrázek 35.	Maxwellův model -----	45
Obrázek 36.	Kelvinův model -----	48
Obrázek 37.	Schéma umělého neuronu [22] -----	51
Obrázek 38.	Schéma neuronové sítě [22] -----	51
Obrázek 39.	Aktivační funkce neuronu [22] -----	51

## Seznam tabulek

Tabulka 1.	Deformace popsané pomocí reologických modelů -----	20
Tabulka 2.	Charakteristika hodnocených materiálů -----	33
Tabulka 3.	Průměrné hodnoty naměřených úhlů -----	37
Tabulka 4.	Reálné a vypočítané hodnoty deformací -----	43
Tabulka 5.	Analyticky vyjádřená deformace -----	44
Tabulka 6.	Naměřené a vypočítané hodnoty potřebné pro vyjádření modulu pružnosti a viskozity pro Maxwellův model -----	46
Tabulka 7.	Naměřené a vypočítané hodnoty potřebné pro vyjádření modulu pružnosti a viskozity pro Kelvinův model -----	49

## Seznam grafů

Graf 1.	Křivka zotavení textilií -----	38
Graf 2.	Uhel zotavení pro materiál a) Z2, b) Z3, c) Z4 -----	39
Graf 3.	Průměrné hodnoty úhlů zotavení pro bavlněné materiály -----	39
Graf 4.	Uhel zotavení pro materiál a) Z5, b) Z6 -----	40
Graf 5.	Průměrných hodnoty úhlů zotavení pro lněné materiály -----	40
Graf 6.	Znázornění relaxace vzorků a) Z1 b) Z7 c) Z8 -----	41
Graf 7.	Průměrné úhly zotavení pro vlnu, viskózu a polyester -----	42
Graf 8.	Vyjádření plastické, viskoelastické a elastické deformace -----	43

<i>Graf 9.</i>	<i>Křivka průběhu deformace textilií -----</i>	<i>45</i>
<i>Graf 10.</i>	<i>Aproximace křivky zotavení (Maxwellův model) pro všechny materiály ---</i>	<i>47</i>
<i>Graf 11.</i>	<i>Modul pružnosti -----</i>	<i>48</i>
<i>Graf 12.</i>	<i>Viskozita -----</i>	<i>48</i>
<i>Graf 13.</i>	<i>Aproximace křivky zotavení (Kelvinův model) pro všechny materiály ----</i>	<i>50</i>
<i>Graf 14.</i>	<i>Grafy popisující neuronové sítě, počet neuronu 5-3, kde nezávislé proměnné byly všechny charakteristické hodnoty a závislé proměnné naměřené úhly zotavení v čase 1 a 300 sekund. -----</i>	<i>53</i>

## Seznam příloh

<i>Příloha 1</i>	<i>Vzorky materiálů</i>
<i>Příloha 2</i>	<i>Naměřené hodnoty úhlů zotavení pro všechny materiály</i>
<i>Příloha 3</i>	<i>Vyjádření deformace podle Kelvinova modelu</i>
<i>Příloha 4</i>	<i>Postup při zadávání neuronových sítí</i>
<i>Příloha 5</i>	<i>Neuronové sítě</i>

## **PŘÍLOHY**

**Příloha 1**

**Charakteristika materiálů**

<b>Z1</b>	<b>Z2</b>
<b>Z3</b>	<b>Z4</b>
<b>Z5</b>	<b>Z6</b>
<b>Z7</b>	<b>Z8</b>

**Příloha 2 -Naměřené hodnoty úhlů zotavení pro všechny materiály**

<b>Z1</b>	$\varnothing\alpha$ [°]												
t [s]	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	$\varnothing$ [°]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	140,78	146,45	144,13	141,45	146,18	146,06	134,41	141,52	144,42	135,67	150,71	147,25	143,25
2	147,06	151,92	148,96	148,59	151,33	152,06	144,26	146,83	150,21	144,64	154,95	152,07	149,41
3	149,50	154,09	151,11	151,21	153,49	153,98	147,46	148,55	152,57	147,46	156,67	154,06	151,68
4	151,02	155,40	152,16	152,51	154,57	155,23	148,83	149,87	153,88	148,84	157,80	155,00	152,93
5	151,99	156,33	153,13	153,66	155,33	155,90	150,00	150,81	154,53	150,05	158,58	155,80	153,84
6	153,05	157,04	153,74	154,50	155,93	156,63	150,81	151,38	155,41	150,79	159,27	156,46	154,58
7	153,82	157,39	154,20	155,10	156,42	157,17	151,60	151,90	155,87	151,34	159,67	156,89	155,12
8	154,20	157,88	154,67	155,42	156,84	157,51	152,20	152,41	156,25	152,12	159,94	157,27	155,56
9	154,73	158,17	155,02	156,04	157,30	158,02	152,90	152,88	156,93	152,51	160,42	157,66	156,05
10	155,19	158,38	155,30	156,50	157,70	158,08	153,26	153,24	157,26	153,17	160,93	157,92	156,41
15	156,32	159,72	156,05	157,98	158,68	159,23	154,77	154,52	157,95	154,40	161,57	158,90	157,51
20	157,30	160,14	156,73	158,82	159,14	159,90	155,67	155,15	158,88	155,48	162,32	159,56	158,26
25	158,00	160,79	157,37	159,65	159,66	160,68	156,70	155,72	159,35	156,18	162,71	160,00	158,90
30	158,35	161,07	157,80	159,97	160,14	161,23	157,43	156,00	159,76	156,85	163,39	160,67	159,39
35	159,08	161,57	158,34	160,48	160,54	161,73	158,17	156,60	160,13	156,97	163,57	160,97	159,85
40	159,40	162,02	158,59	160,98	160,82	161,88	158,74	156,87	160,56	157,48	163,73	161,25	160,19
45	159,78	162,28	158,98	161,29	161,10	162,39	158,96	157,20	160,95	157,73	164,18	161,60	160,54
50	160,19	162,59	159,15	161,42	161,44	162,51	159,33	157,44	161,26	158,15	164,55	161,69	160,81
55	160,60	162,82	159,47	162,11	161,79	162,85	159,62	157,51	161,74	158,39	164,47	161,85	161,10
60	160,82	163,05	159,72	162,34	162,07	163,05	159,90	157,92	162,11	158,61	164,80	162,05	161,37
120	162,06	164,10	160,32	163,27	163,11	163,86	161,72	159,03	162,91	159,99	165,54	163,06	162,41
180	162,51	164,39	161,09	164,05	163,85	164,42	162,66	159,85	163,22	160,89	166,28	163,59	163,07
240	163,11	164,94	161,36	164,47	164,24	164,99	163,29	160,26	164,23	161,90	166,61	164,16	163,63
300	163,61	165,36	161,62	165,13	164,57	165,12	163,72	160,52	164,55	162,32	166,98	164,48	164,00

<b>Z2</b>	$\varnothing\alpha$ [°]												
t [s]	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	$\varnothing$ [°]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	89,36	93,46	100,64	92,36	96,33	101,05	88,56	96,19	99,74	90,69	101,33	103,45	96,10
2	97,58	101,00	107,57	99,63	104,19	107,99	95,82	103,56	108,38	98,15	107,54	110,30	103,47
3	100,45	103,65	110,48	102,79	107,08	110,65	98,92	106,09	111,39	101,11	110,10	113,04	106,31
4	102,28	105,42	112,46	105,02	109,16	112,25	100,91	107,57	113,14	103,09	111,66	114,70	108,14
5	103,92	106,88	113,84	106,34	110,11	113,40	102,27	108,68	114,53	104,31	112,94	115,68	109,41
6	104,94	107,89	114,73	107,36	111,18	114,45	103,53	109,67	115,86	105,34	113,91	116,48	110,44
7	105,82	108,61	115,66	108,11	112,01	115,29	104,30	110,38	116,77	106,25	114,67	117,29	111,26
8	106,71	109,32	116,42	108,88	112,40	115,83	104,95	111,16	117,55	107,01	115,16	117,80	111,93
9	106,76	109,90	117,09	109,65	113,05	116,46	105,60	112,34	118,17	107,57	115,61	118,41	112,55
10	107,58	110,55	117,73	110,21	113,67	117,04	106,02	112,79	118,77	108,12	116,22	119,01	113,14
15	110,17	112,37	119,81	112,59	115,54	119,23	108,30	114,30	120,92	110,54	117,59	120,73	115,17
20	111,38	113,69	120,87	113,84	117,19	120,24	109,47	115,51	122,39	112,07	118,63	121,84	116,42
25	112,41	114,73	122,05	115,13	118,20	121,35	110,57	116,28	123,33	113,06	119,44	122,82	117,45
30	113,20	115,36	122,88	115,85	119,06	122,15	111,44	117,07	123,78	113,58	120,10	123,52	118,17
35	113,93	115,91	123,50	116,70	119,35	122,73	112,11	117,76	124,45	114,30	120,67	124,24	118,80
40	114,71	116,58	123,91	117,04	120,02	123,10	112,58	118,35	125,06	114,98	121,20	124,53	119,34
45	115,50	117,26	124,41	117,67	120,31	123,48	113,28	118,85	125,44	115,37	121,64	125,03	119,85
50	115,89	117,83	124,84	118,18	120,93	123,85	113,74	119,47	125,86	115,80	121,99	125,52	120,32
55	116,18	118,24	125,20	119,05	121,12	124,31	114,14	119,86	126,31	116,07	122,44	125,89	120,73
60	116,34	118,72	125,53	119,04	121,54	124,40	114,64	120,04	126,68	116,67	122,79	126,20	121,05
120	118,85	120,72	127,73	121,44	123,29	126,98	117,21	122,00	128,94	118,74	124,57	127,97	123,20
180	119,85	121,42	128,69	122,46	124,34	128,11	118,39	122,78	129,72	119,92	125,48	129,09	124,19
240	120,74	122,23	129,73	123,06	125,33	128,82	119,33	123,82	130,61	120,83	126,24	129,68	125,03
300	121,26	122,80	129,88	123,98	126,05	129,15	119,96	123,97	131,02	121,39	126,79	130,27	125,54



<b>Z3</b>	$\varnothing\alpha$ [°]												
t [s]	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	$\varnothing$ [°]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	69,85	78,79	83,92	80,40	95,15	92,72	72,83	74,88	88,06	75,37	88,60	74,47	81,25
2	75,97	82,38	87,88	85,64	99,29	97,41	78,06	78,52	91,57	80,19	92,63	79,70	85,77
3	78,92	84,42	89,78	88,05	101,21	99,28	80,02	79,85	93,09	82,11	94,63	81,90	87,77
4	80,13	85,30	90,87	89,45	102,59	100,76	81,41	80,76	93,95	83,30	95,86	83,43	88,98
5	81,34	86,11	91,70	90,33	103,35	101,58	82,46	81,49	94,74	84,44	96,85	84,48	89,91
6	82,35	86,64	92,35	91,12	104,28	102,37	83,17	81,90	95,29	85,14	97,39	85,13	90,59
7	83,03	87,30	93,16	91,69	104,98	102,97	83,89	82,19	95,66	85,63	97,76	85,76	91,17
8	83,42	87,78	93,72	92,28	105,44	103,49	84,47	82,63	96,00	86,12	98,23	86,19	91,65
9	84,06	88,33	94,10	92,74	105,81	104,03	84,97	82,93	96,14	86,59	98,83	86,46	92,08
10	84,66	88,52	94,31	93,44	106,07	104,46	85,60	83,19	96,78	87,06	99,16	86,98	92,52
15	86,41	90,12	96,13	95,29	107,64	106,40	87,40	83,87	97,80	89,11	100,54	89,00	94,14
20	87,83	90,98	97,04	96,61	108,68	107,40	88,48	84,63	98,34	90,06	101,60	89,90	95,13
25	88,65	91,47	97,88	97,33	109,41	107,94	89,21	85,19	98,96	90,98	102,38	90,86	95,85
30	89,45	92,05	98,24	97,91	110,08	108,59	90,10	85,50	99,57	91,69	102,96	91,49	96,47
35	89,92	92,68	98,79	98,72	110,49	108,86	90,58	85,97	99,87	92,24	103,30	92,15	96,96
40	90,49	93,08	99,12	99,19	110,87	109,34	91,15	86,39	100,12	92,56	103,69	92,51	97,38
45	91,19	93,26	99,63	99,70	111,11	109,69	91,56	86,47	100,34	92,96	104,24	92,93	97,76
50	91,77	93,63	100,08	100,05	111,51	109,90	91,86	86,87	100,80	93,46	104,42	93,38	98,14
55	92,04	93,96	100,23	100,40	111,72	110,20	92,18	86,98	100,87	93,64	104,70	93,63	98,38
60	92,35	94,18	100,65	100,62	111,87	110,44	92,49	87,33	101,12	93,93	104,92	93,89	98,65
120	94,55	96,41	102,53	103,00	113,90	112,58	94,89	89,18	103,13	95,99	106,94	96,05	100,76
180	95,79	96,75	103,52	104,15	114,78	113,78	95,70	89,84	103,62	97,38	107,99	97,34	101,72
240	96,75	97,59	103,99	105,02	115,45	114,43	96,48	90,18	104,14	98,13	108,57	98,23	102,41
300	97,45	98,03	104,24	105,63	115,86	114,62	96,99	90,42	104,72	98,46	109,00	98,64	102,84

<b>Z4</b>	$\varnothing\alpha$ [°]												
t [s]	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	$\varnothing$ [°]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	73,11	68,87	75,53	78,66	93,94	87,40	68,75	72,31	72,87	79,59	91,31	88,32	79,22
2	79,01	72,67	80,26	84,09	98,68	92,23	73,71	77,30	76,84	85,39	95,16	93,04	84,03
3	80,99	74,61	82,16	86,92	100,37	94,53	75,64	79,11	78,75	87,94	97,05	94,92	86,08
4	82,24	75,68	83,72	89,07	101,65	95,87	76,83	80,08	80,15	89,72	98,13	96,09	87,44
5	83,24	76,24	84,87	90,37	102,48	96,90	77,66	80,81	81,03	90,69	98,87	97,13	88,36
6	83,82	76,86	85,57	90,92	103,30	97,67	78,41	81,63	81,83	91,85	99,53	97,93	89,11
7	84,58	77,33	85,99	91,70	103,90	98,18	78,94	82,20	82,49	92,59	99,92	98,40	89,68
8	85,17	77,92	86,73	92,51	104,25	98,70	79,60	82,71	82,96	93,38	100,62	98,74	90,27
9	85,56	78,21	87,27	93,23	104,62	99,27	80,17	83,20	83,67	94,05	100,88	99,22	90,78
10	85,81	78,93	87,95	93,80	105,29	100,09	80,41	83,53	84,08	94,62	101,37	99,62	91,29
15	87,72	80,33	89,88	95,93	106,85	101,60	81,93	84,27	85,70	96,62	102,61	101,33	92,90
20	88,57	80,67	91,04	97,04	107,94	102,34	82,99	85,41	86,52	97,99	103,50	102,36	93,86
25	89,32	81,60	92,25	97,88	108,77	103,05	83,91	86,41	87,44	99,01	104,42	103,00	94,76
30	89,94	82,26	92,93	98,67	109,47	103,68	84,68	86,99	88,25	99,91	105,01	103,61	95,45
35	90,39	82,61	93,38	99,39	110,09	104,27	85,32	87,39	88,60	100,59	105,64	104,20	95,99
40	90,91	82,92	93,86	100,12	110,48	104,79	85,81	88,04	89,09	101,20	106,05	104,63	96,49
45	91,38	83,23	94,44	100,74	110,76	105,05	86,22	88,70	89,44	101,66	106,54	105,21	96,95
50	91,47	83,44	95,05	101,04	111,17	105,69	86,67	88,73	90,19	102,02	106,89	105,46	97,32
55	91,69	83,92	95,24	101,50	111,60	105,81	86,77	89,07	90,31	102,50	107,15	105,65	97,60
60	92,18	84,11	95,86	101,97	111,84	106,10	87,28	89,36	90,80	102,93	107,26	105,80	97,96
120	94,35	85,53	97,95	104,27	113,67	108,35	88,87	90,76	92,84	105,33	108,97	107,98	99,91
180	94,97	86,43	99,19	105,24	114,64	109,44	89,62	91,55	93,66	106,46	110,17	108,77	100,84
240	95,64	86,87	100,10	106,23	115,21	110,13	90,38	92,34	94,47	107,61	110,79	109,45	101,60
300	96,26	87,31	101,01	107,08	115,87	110,32	90,81	92,78	95,10	108,22	111,23	109,87	102,16

<b>Z5</b>	$\varnothing\alpha$ [°]												
t [s]	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	$\varnothing$ [°]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	62,01	75,86	81,92	68,82	81,55	78,15	56,16	74,64	81,86	69,72	84,44	90,33	75,45
2	67,06	80,52	86,83	73,47	86,28	84,76	61,06	78,67	87,55	76,34	88,53	94,75	80,48
3	69,54	82,52	89,21	76,04	88,40	87,14	63,02	80,51	89,87	78,69	90,29	97,65	82,74
4	70,89	83,79	90,47	77,50	89,48	88,66	64,69	81,90	91,38	80,21	91,60	98,70	84,11
5	71,89	84,87	91,64	78,54	90,61	89,75	65,73	82,76	92,46	81,21	92,54	99,74	85,14
6	72,56	85,43	92,37	79,30	91,65	90,58	66,41	83,43	93,34	82,07	93,05	100,40	85,88
7	72,98	86,34	92,97	79,83	92,32	91,28	67,31	83,97	94,28	83,01	93,82	101,08	86,60
8	73,80	86,69	93,51	80,41	92,79	91,99	68,02	84,79	94,61	83,42	94,30	101,77	87,18
9	74,27	87,20	94,05	81,04	93,25	92,45	68,36	85,18	95,07	83,86	94,64	101,99	87,61
10	74,70	87,46	94,54	81,56	93,71	93,02	68,82	85,65	95,50	84,30	94,91	102,54	88,06
15	76,70	89,21	96,34	83,62	95,80	94,85	70,70	87,30	97,10	86,09	97,06	104,82	89,97
20	77,98	90,42	97,80	84,83	96,90	96,16	72,09	88,25	98,29	87,19	98,13	105,78	91,15
25	78,41	91,26	98,77	85,83	98,14	97,15	72,93	88,99	99,09	88,11	99,21	106,96	92,07
30	79,16	91,84	99,33	86,58	98,73	97,83	73,85	89,66	99,79	88,68	99,87	107,30	92,72
35	79,80	92,42	99,93	87,29	99,79	98,41	74,53	90,42	100,50	89,19	100,26	107,56	93,34
40	80,35	92,81	100,42	87,77	100,30	98,97	75,20	90,99	100,85	90,04	100,95	107,93	93,88
45	80,91	93,41	100,84	88,23	100,74	99,46	75,63	91,44	101,30	90,56	101,35	108,35	94,35
50	81,45	93,74	101,24	88,61	101,01	99,67	75,99	91,71	101,55	90,98	101,78	108,79	94,71
55	81,71	94,14	101,52	89,07	101,53	99,99	76,33	92,09	101,98	91,27	102,08	109,18	95,07
60	82,13	94,27	101,76	89,25	101,82	100,81	76,70	92,29	102,21	91,64	102,54	109,46	95,41
120	84,33	96,64	104,32	91,84	104,20	102,87	79,03	94,33	104,65	93,89	104,67	111,84	97,72
180	85,64	97,60	105,66	93,14	105,56	104,08	80,42	95,52	106,00	95,08	105,78	112,62	98,92
240	86,35	98,11	106,60	94,08	106,50	104,78	81,35	96,25	106,62	95,67	106,53	113,78	99,72
300	87,07	98,88	107,10	94,68	106,96	105,45	81,78	97,03	107,04	96,52	106,71	113,86	100,26

<b>Z6</b>	$\varnothing\alpha$ [°]												
t [s]	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	$\varnothing$ [°]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	53,83	67,80	73,58	61,78	75,96	72,08	54,27	75,16	68,23	62,64	69,99	75,35	67,56
2	59,13	72,21	78,71	66,64	80,56	77,51	58,85	79,37	73,03	67,33	74,41	79,96	72,31
3	61,61	74,43	81,24	69,17	82,67	79,43	60,92	81,75	74,77	69,29	76,42	82,45	74,51
4	63,17	75,83	82,84	70,55	84,28	80,75	62,15	83,06	76,38	70,93	77,43	83,21	75,88
5	63,93	76,78	84,01	71,46	85,21	81,71	63,18	84,14	77,18	71,51	78,45	84,13	76,81
6	64,87	77,50	84,65	72,53	85,98	82,59	63,84	84,82	78,10	72,45	79,19	85,19	77,64
7	65,71	78,09	85,40	73,16	86,80	83,13	64,79	85,49	78,51	73,08	80,24	85,89	78,36
8	66,30	78,54	85,87	73,73	87,58	83,75	65,13	86,17	79,14	73,94	80,94	86,38	78,96
9	66,52	79,16	86,32	74,38	87,97	84,39	65,54	86,59	79,47	74,45	81,41	86,78	79,42
10	67,13	79,59	86,90	74,80	88,29	84,78	65,91	87,14	80,01	74,93	82,03	87,19	79,89
15	69,04	81,34	88,78	76,61	90,45	86,59	67,96	89,05	82,06	76,63	84,03	89,14	81,81
20	70,19	82,45	89,96	77,85	91,11	87,89	68,90	90,09	83,26	77,80	85,36	90,70	82,96
25	71,25	83,43	90,90	78,62	92,01	88,72	69,75	91,10	84,53	79,06	86,09	91,45	83,91
30	71,62	83,87	91,76	79,38	92,57	89,35	70,54	91,87	85,00	79,56	87,08	92,30	84,58
35	72,33	84,68	92,11	79,73	93,31	89,94	70,94	92,38	85,33	80,26	87,80	92,64	85,12
40	72,81	85,03	92,74	80,31	93,38	90,51	71,42	92,73	86,26	80,89	88,10	93,20	85,61
45	73,24	85,35	93,32	80,97	93,94	90,96	71,93	93,19	86,55	81,30	88,57	93,59	86,07
50	73,72	85,60	93,44	81,27	94,46	91,38	72,13	93,57	86,97	81,87	89,16	94,02	86,47
55	73,92	86,10	94,18	81,99	94,85	91,50	72,30	93,92	87,30	81,98	89,64	94,44	86,84
60	74,10	86,37	94,27	82,09	95,20	91,93	72,72	94,24	87,45	82,49	90,15	94,61	87,13
120	76,95	88,64	96,60	84,22	97,12	94,25	75,26	96,69	90,14	84,42	92,66	97,21	89,51
180	77,85	90,06	97,79	85,31	98,27	95,35	76,74	98,28	90,98	85,73	93,63	98,40	90,70
240	78,52	90,78	98,66	85,97	99,08	96,11	76,94	99,07	91,80	86,87	94,22	99,02	91,42
300	78,91	91,22	99,23	86,65	99,78	96,67	77,64	99,51	92,45	87,42	95,05	99,34	91,99

<b>z7</b>	$\varnothing\alpha$ [°]												
t [s]	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	$\varnothing$ [°]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	147,68	150,81	148,09	150,97	157,23	154,68	146,45	145,69	150,05	151,14	157,49	151,63	150,99
2	154,40	154,12	151,93	156,03	161,70	159,26	151,34	149,53	154,15	156,67	162,31	156,34	155,65
3	156,70	155,98	154,14	158,92	163,77	161,27	153,88	151,44	156,17	159,30	164,26	158,39	157,85
4	157,95	157,27	155,26	160,36	165,10	162,34	155,10	152,82	157,37	160,82	165,62	159,67	159,14
5	158,80	158,10	155,97	161,55	165,84	163,41	156,04	153,87	158,27	162,05	166,51	160,81	160,10
6	159,68	158,66	156,64	162,51	166,47	163,94	156,62	154,55	159,01	162,97	166,96	161,48	160,79
7	160,34	159,45	157,16	163,33	167,21	164,58	156,84	155,06	159,62	163,67	167,76	161,97	161,42
8	160,80	160,01	157,68	164,03	167,59	164,98	157,44	155,65	160,09	164,19	168,14	162,64	161,94
9	161,40	160,45	158,18	164,75	168,18	165,47	158,04	156,14	160,49	164,71	168,73	163,01	162,46
10	161,82	160,77	158,53	165,12	168,56	165,69	158,35	156,83	161,00	164,99	169,11	163,39	162,85
15	163,29	161,91	160,43	167,13	169,86	167,68	160,17	157,67	162,35	167,25	170,79	164,93	164,45
20	164,35	162,45	161,40	168,63	170,74	168,42	160,74	158,49	163,35	168,13	171,21	165,84	165,31
25	164,93	163,25	162,22	169,93	171,11	168,96	161,23	159,20	164,00	168,70	171,97	166,44	166,00
30	165,25	163,73	162,52	170,80	171,68	169,53	161,83	159,64	164,70	169,48	172,29	167,03	166,54
35	165,87	164,11	162,90	171,63	172,44	169,95	162,47	160,08	165,05	170,03	172,74	167,54	167,07
40	166,47	164,64	163,45	172,08	173,00	170,38	162,80	160,46	165,48	170,67	173,17	167,80	167,53
45	166,68	165,00	163,72	172,30	173,33	170,80	163,16	160,75	166,04	170,99	173,32	168,18	167,85
50	166,87	165,34	164,30	172,63	174,02	170,94	163,29	161,03	166,28	171,25	173,79	168,46	168,18
55	167,19	165,35	164,47	172,93	173,99	171,39	163,56	161,25	166,67	171,60	174,13	169,06	168,46
60	167,43	165,53	164,71	172,99	174,85	171,59	163,81	161,30	167,01	171,95	174,38	169,44	168,75
120	168,79	166,73	166,51	175,21	176,04	173,28	165,44	162,72	168,63	174,11	175,85	170,87	170,35
180	169,22	167,27	167,12	176,47	176,88	174,03	166,32	163,44	169,33	174,86	175,95	171,74	171,05
240	169,91	167,59	167,61	177,10	177,31	174,49	166,88	164,15	169,64	175,38	176,57	172,05	171,56
300	170,08	168,16	167,98	177,39	177,82	175,14	167,13	164,24	169,94	176,05	176,59	172,37	171,91

<b>Z8</b>	$\varnothing\alpha$ [°]												
t [s]	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	$\varnothing$ [°]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	85,54	95,28	109,97	119,88	133,77	108,81	83,18	86,45	108,61	119,17	126,18	110,21	107,25
2	91,51	101,47	117,27	130,94	139,74	115,74	90,94	93,01	115,30	129,70	132,97	115,09	114,47
3	93,57	104,78	120,73	136,07	142,45	118,16	93,48	94,87	118,28	134,75	136,38	117,42	117,58
4	95,53	106,14	123,05	139,28	144,25	119,59	95,26	96,33	120,35	137,91	138,40	118,87	119,58
5	96,52	107,03	124,46	141,83	145,53	120,76	96,47	97,62	121,30	140,64	139,94	119,83	121,00
6	97,53	107,77	125,63	143,74	146,60	121,71	97,29	98,18	122,56	142,58	141,25	120,58	122,12
7	98,09	108,77	126,70	145,02	147,36	122,25	97,72	98,85	123,39	144,32	142,30	121,37	123,01
8	98,79	109,43	127,33	146,21	148,15	122,83	98,41	99,64	124,16	145,64	143,01	121,91	123,79
9	99,33	110,01	128,06	147,34	148,68	123,40	98,78	100,04	124,56	146,82	143,75	122,20	124,41
10	99,74	110,76	128,74	148,35	149,69	123,87	99,31	100,51	125,35	147,72	144,86	122,62	125,13
15	101,61	112,69	131,78	152,37	151,77	125,74	101,53	102,36	127,82	151,47	147,64	124,17	127,58
20	102,88	113,26	133,46	154,90	153,27	126,93	102,55	103,27	128,94	154,34	149,17	125,04	129,00
25	103,70	114,23	134,88	156,94	154,34	127,80	103,77	104,18	130,31	156,39	150,38	125,87	130,23
30	104,55	114,77	135,79	158,74	154,97	128,37	104,68	104,42	131,51	158,10	151,18	126,59	131,14
35	105,16	115,67	136,83	160,00	155,90	128,87	105,33	104,95	132,33	159,38	152,13	126,86	131,95
40	105,48	116,23	137,59	161,08	156,58	129,53	105,64	105,48	132,87	160,48	152,45	127,71	132,59
45	106,08	116,50	138,37	161,66	156,94	129,94	106,27	105,48	133,27	161,26	152,90	127,79	133,04
50	106,37	117,20	138,89	162,65	157,54	130,41	106,39	105,79	133,85	162,06	153,29	128,12	133,55
55	106,78	117,87	139,46	163,16	158,34	130,60	107,12	106,07	134,23	162,67	153,79	128,43	134,04
60	107,01	117,95	139,58	163,84	159,14	130,77	107,59	106,41	134,73	163,09	154,29	128,59	134,42
120	109,68	120,16	142,10	168,56	161,28	132,84	109,81	109,01	137,84	167,70	157,26	130,81	137,26
180	110,59	120,23	143,80	170,43	162,25	133,92	111,13	109,85	139,16	169,68	158,50	131,80	138,44
240	111,39	121,32	145,07	171,64	163,08	134,64	112,12	110,42	139,91	170,78	159,71	132,76	139,40
300	111,88	121,85	145,49	172,32	163,66	135,11	112,54	110,39	140,76	171,81	159,96	133,30	139,92

### Příloha 3 –Vyjádření deformace podle Kelvinova modelu

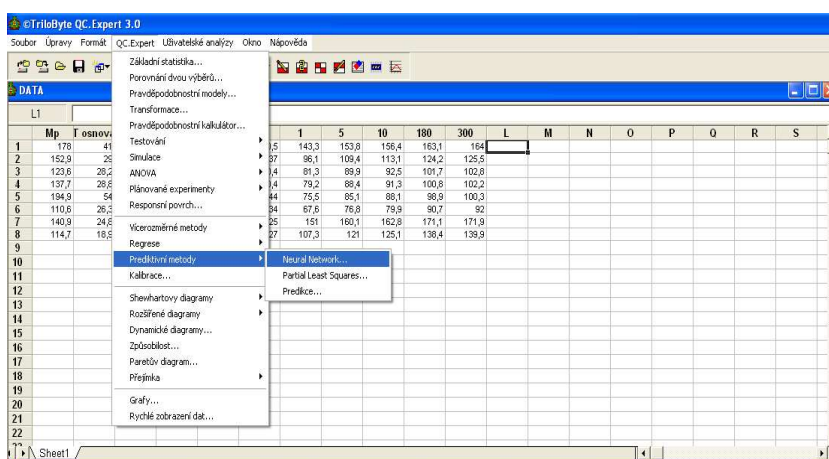
materiál	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
t [s]	$\varepsilon$ [-]	$\varepsilon$ [-]	$\varepsilon$ [-]	$\varepsilon$ [-]	$\varepsilon$ [-]	$\varepsilon$ [-]	$\varepsilon$ [-]	$\varepsilon$ [-]
0	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0,968	0,99	1,056	1,045	1,056	1,068	0,957	0,979
2	0,937	0,973	1,046	1,035	1,046	1,059	0,916	0,958
3	0,907	0,957	1,036	1,025	1,037	1,05	0,877	0,937
4	0,878	0,941	1,027	1,015	1,027	1,04	0,839	0,916
5	0,85	0,925	1,017	1,005	1,018	1,031	0,803	0,896
6	0,823	0,909	1,008	0,995	1,008	1,022	0,769	0,877
7	0,797	0,894	0,999	0,985	0,999	1,013	0,736	0,857
8	0,771	0,879	0,989	0,975	0,99	1,005	0,704	0,838
9	0,746	0,864	0,98	0,966	0,981	0,996	0,674	0,82
10	0,723	0,85	0,971	0,956	0,972	0,987	0,645	0,802
15	0,614	0,781	0,927	0,91	0,928	0,945	0,518	0,718
20	0,522	0,718	0,885	0,867	0,886	0,904	0,416	0,643
25	0,444	0,66	0,845	0,825	0,845	0,865	0,335	0,575
30	0,377	0,606	0,806	0,786	0,807	0,828	0,269	0,515
35	0,321	0,557	0,77	0,748	0,771	0,793	0,216	0,461
40	0,272	0,512	0,735	0,712	0,736	0,759	0,173	0,412
45	0,232	0,471	0,702	0,678	0,702	0,726	0,139	0,369
50	0,197	0,433	0,67	0,645	0,671	0,695	0,112	0,33
55	0,167	0,398	0,639	0,614	0,64	0,665	0,09	0,296
60	0,142	0,365	0,61	0,585	0,611	0,637	0,072	0,265
120	0,02	0,133	0,35	0,324	0,35	0,376	0,005	0,07
180	0,003	0,048	0,2	0,18	0,201	0,222	0	0,018
240	0	0,017	0,115	0,1	0,115	0,131	0	0,005
300	0	0,006	0,066	0,055	0,066	0,078	0	0,001

## Příloha 4 -Postup při zadávání neuronových sítí

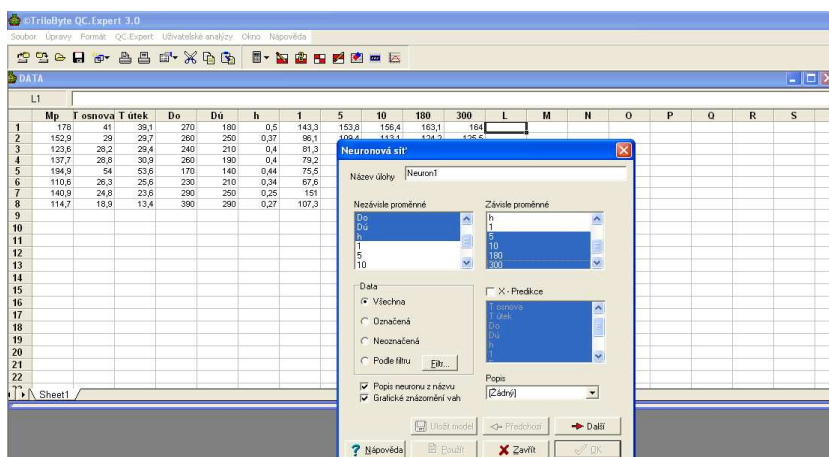
1, Určit data, které budeme vyhodnocovat. Závislé a nezávislé hodnoty musí mít stejný počet řádků.

L1	Mp	T osnova	T utek	Do	Du	h	t	s	10	180	300	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	178	41	36,1	270	180	0,5	143,3	153,8	156,4	163,1	164								
2	152,9	29	29,7	260	250	0,37	96,1	109,4	113,1	124,2	125,5								
3	123,6	28,2	29,4	240	210	0,4	81,3	89,9	92,5	101,7	102,8								
4	137,7	28,8	30,9	260	190	0,4	79,2	88,4	91,3	100,8	102,2								
5	194,9	54	53,6	170	140	0,44	75,5	85,1	88,1	98,9	100,3								
6	110,6	26,3	25,6	230	210	0,34	67,6	76,8	79,9	90,7	92								
7	140,9	24,8	23,6	290	250	0,25	151	160,1	162,8	171,1	171,9								
8	114,7	19,9	13,4	390	290	0,27	107,3	121	125,1	136,4	139,9								
9																			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
20																			
21																			
22																			

2, Z lišty přes kolonku „QC Expert“, „Predikční metody“ zvolím „Neural Network“

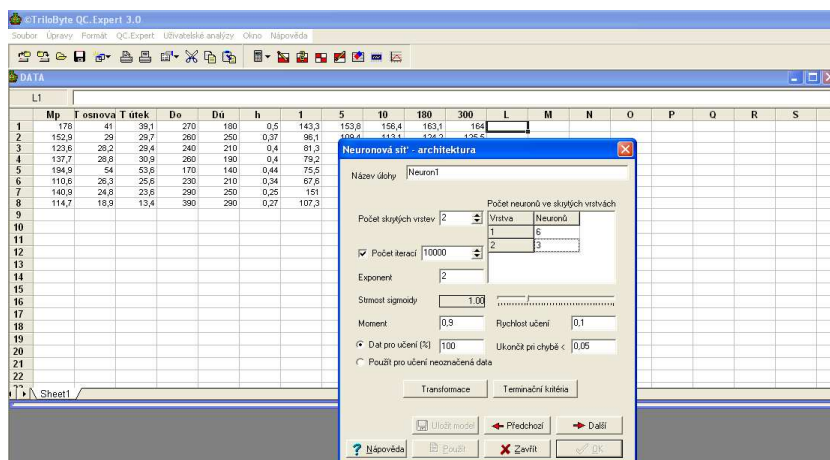


3, Zadat které hodnoty budou „Nezávislé“ a „Závislé“. Zvolit „Popis neuronu z názvu“ a „Grafické znázornění vah“.

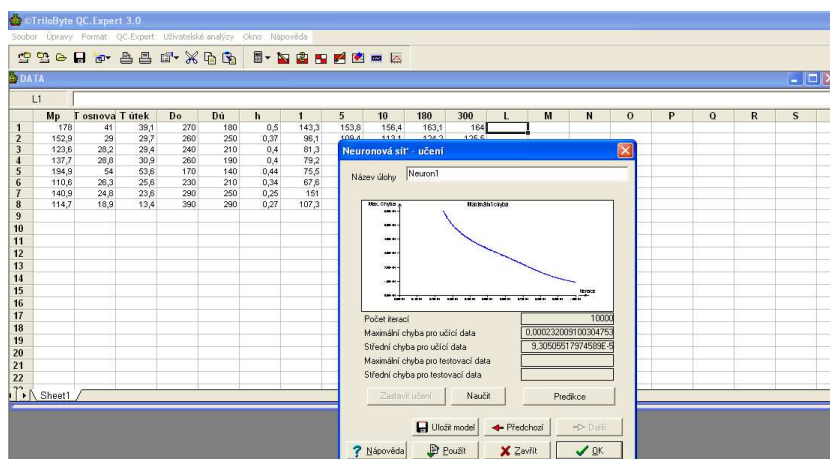




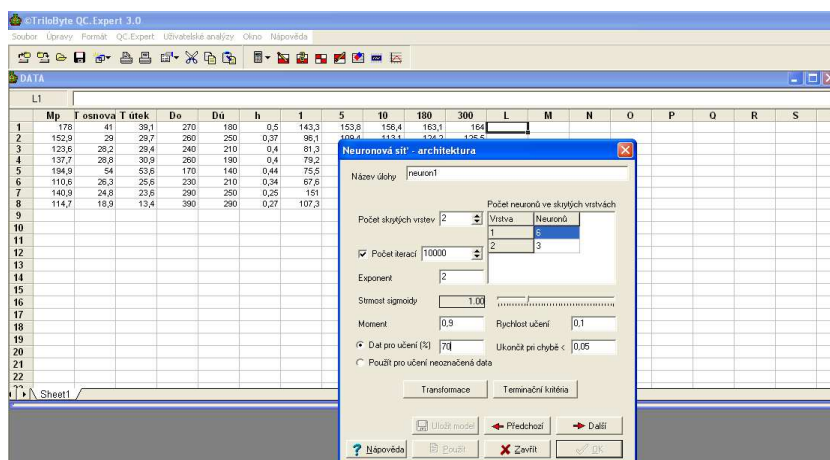
4, Určit „počet skrytých vrstev“ a „počet neuronů ve skrytých vrstvách“. V první zadávání hodnot je potřebné dát „data pro učení“ 100%.



5, „Naučením“ sítě byl zhotoven graf

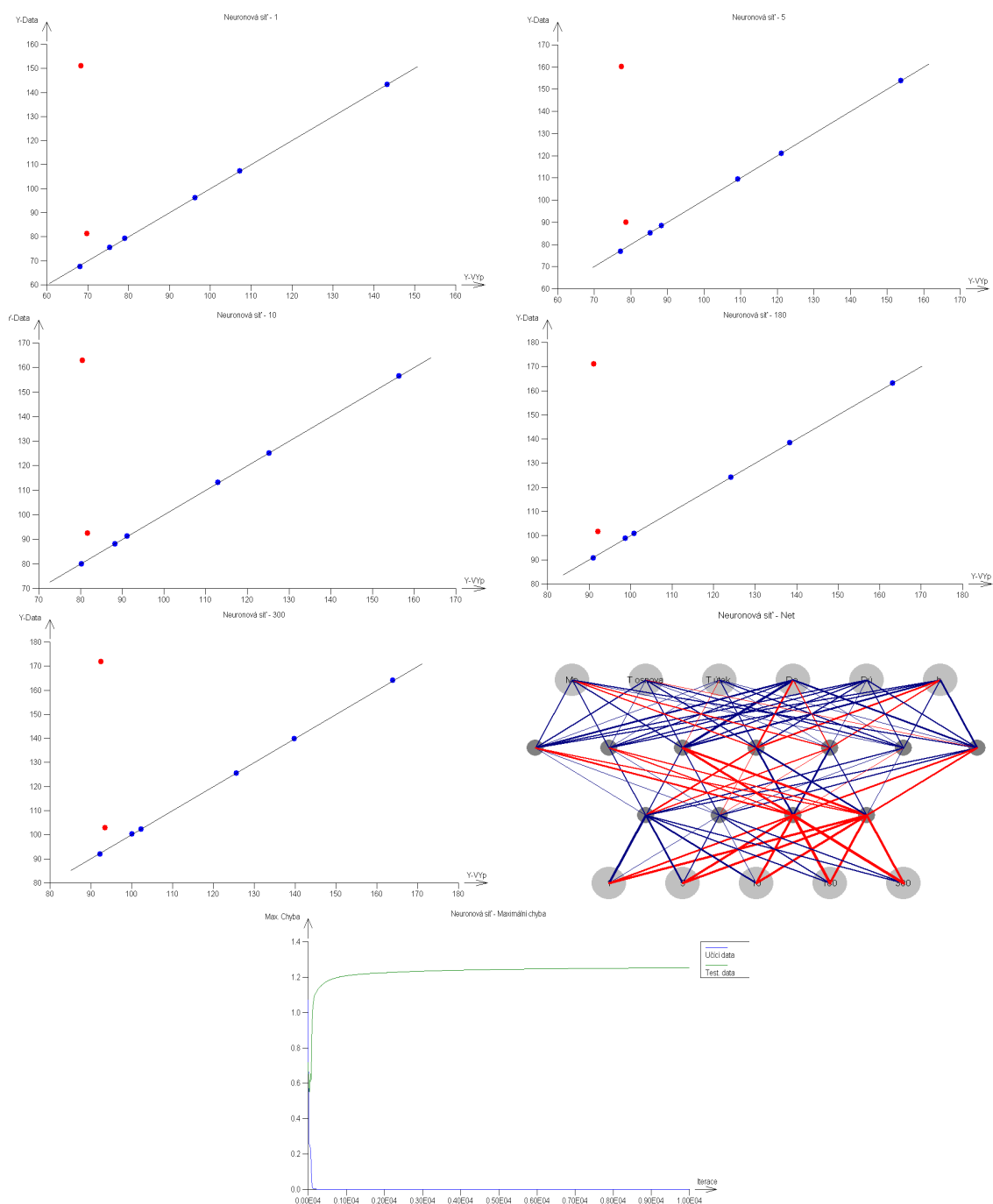


6, Celý postup opakujeme, jenom změníme „data pro určení“ například 70%.

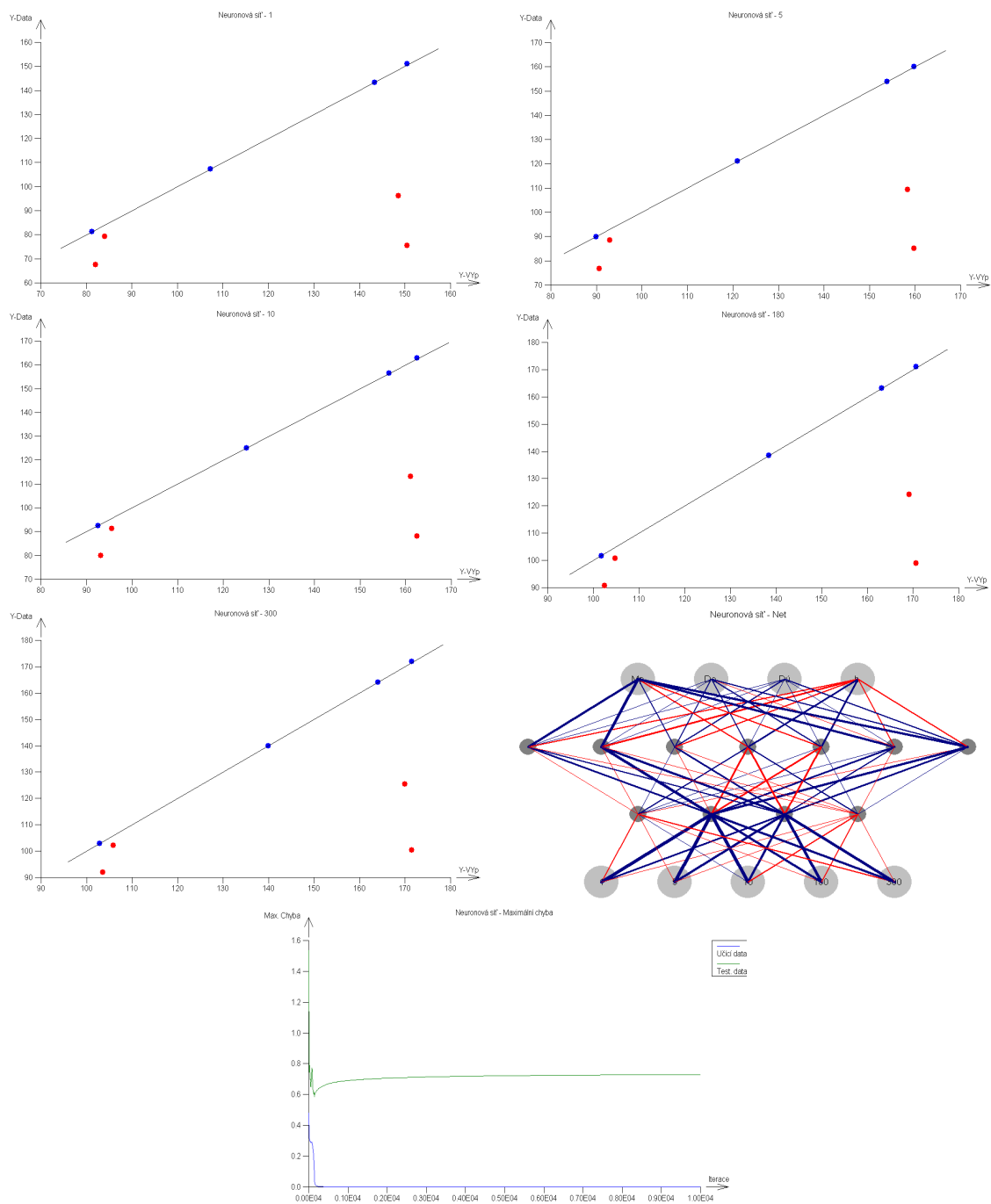








Grafy popisující neuronové sítě 7-4, kde nezávislé proměnné byly všechny charakteristické hodnoty a závislé hodnoty byly naměřené úhly zotavení v 1,5,10,180 a ve 300 sekunde.



Grafy popisující neuronové sítě 7-4, kde nezávislé proměnné byly zvolené charakteristické hodnoty okrem jemnosti a závislé hodnoty byly naměřené úhly zotavení v 1,5,10,180 a ve 300 sekunde.